



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelación mediante un código 3D de la salida de agua desde el alcantarillado a la calle a través de un sumidero

Treball realitzat per:

Alejandro González Alvarado

Dirigit per:

Manuel Gómez Valentín

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 22/09/2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Resumen:

Durante los últimos años, la gran parte de los estudios centrados en el análisis de los flujos que atraviesan la sección de un sumidero, se basaban principalmente en la comprensión y reproducción del proceso de captación de las aguas que circulan por la superficie de las calles, para a continuación ser vertidas en la red de alcantarillado. Para ello, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC adaptó e hizo uso de una plataforma a escala real (1:1) situada en el edificio D1 del campus, con la finalidad de obtener datos empíricos para estos estudios.

Des de hace poco tiempo, este ámbito de la Hidráulica e hidrología ha empezado a centrar sus estudios en intentar comprender el comportamiento de los flujos de agua de salida que se producen cuando la red de drenaje entra en carga, dicho de otra forma, en lugar de entrar flujo de agua a través del sumidero, se genera un caudal de salida hacia la superficie de la calle. Este estudio se ha basado en el análisis de este fenómeno con un código numérico del flujo tridimensional. Esto se ha llevado a cabo mediante el software informático Flow-3D, el cual es capaz de simular este tipo de flujos resolviendo de forma directa las ecuaciones tipo RANS, y proporcionar como resultado una completa información que hace posible realizar un análisis complejo del comportamiento del agua.

En la revisión del estado del arte se han incluido por una parte un conjunto de artículos referentes al estudio de la captación de agua, la mayor parte haciendo uso de programas informáticos de simulación de flujos similares al utilizado en este estudio, y por otra parte, algunas de las pocas publicaciones sobre flujos de salida que se encuentran en el panorama actual. En esta parte incluso se han incluido algunos artículos en fase de revisión de cara a ser publicados a los que hemos podido tener acceso.

El modelo 3D elaborado representa tanto la plataforma como los componentes del sumidero que hacen posible la comunicación entre la superficie de la calle y la red de alcantarillado. Para comprender el comportamiento del flujo de salida de agua se han analizado principalmente los resultados de calado de agua (flujo en estado estacionario) sobre la sección del imbornal obtenidos para diferentes escenarios en los que se han variado los caudales de salida y las pendientes transversal y longitudinal de la plataforma. Con estos datos han sido calculados dos términos importantes en el estudio de este tipo de casos del ámbito de la hidráulica: coeficiente de desagüe (C_d) y constante de pérdidas de carga localizadas (K).

Los resultados obtenidos han mostrado algunos errores en los valores de K para pendientes longitudinales elevadas y caudales reducidos, debidos al desplazamiento de la lámina de agua aguas abajo de la sección del sumidero. En lo que se refiere al coeficiente de desagüe, se ha podido comprobar que los valores considerados hasta la fecha para estos casos eran erróneos, ya que la realidad es que son más reducidos de los que se estipulaba.

Uno de los principales objetivos de este estudio era el hecho de obtener unos datos que sirvieran de referencia de cara a ayudar en la modificación que se pretendía realizar en la plataforma a escala real de la UPC con el objetivo de obtener datos empíricos de este tipo de flujos. A día de hoy, ya se ha ejecutado la modificación y los primeros resultados parciales que se están obteniendo coinciden en orden de magnitud con los proporcionados por las simulaciones por ordenador realizadas con el modelo tridimensional presentado en este estudio.

Agradecimientos:

Para empezar, querría agradecer la insustituible labor realizada por mi tutor, Manuel Gómez Valentín, el cual se ha puesto a mi total disposición durante todo el proceso de ejecución de este trabajo, ofreciéndome desde el principio gran cantidad de información referente al tema tratado en este estudio, y facilitándome todos los medios que estaban a su alcance y que me podían resultar útiles. Sin su apoyo todo esto no habría sido posible.

También me gustaría, por una parte, expresar mi agradecimiento a Eduardo Martínez Gomáriz, por haberme enseñado todos los entresijos referentes a la utilización del software Flow-3D, un programa informático que hasta el inicio de este trabajo desconocía por completo. Por otra parte, quisiera expresar mi gratitud a Jackson David Téllez, ya que siempre ha estado dispuesto a ofrecerme su ayuda cuando la he necesitado. Además, me veo en la obligación de destacar su incansable apoyo durante una fase del trabajo en la que, debido a un virus informático, se perdieron todos los datos referentes al modelo tridimensional, y él no dudo en ponerse mano a mano conmigo para rehacerlo todo desde el principio.

Para acabar, debo mostrar mi gratitud a mi familia por el apoyo incondicional que me han ofrecido a lo largo de todo este tiempo.

Gracias a todos.

Índice

Capítulo 1: Introducción y objetivos.....	1
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
Capítulo 2: Estado del arte.....	4
1. Introducción.....	4
2. Artículos sobre el flujo de entrada a un sumidero.....	4
3. Artículos sobre el flujo de salida desde un sumidero.....	7
Capítulo 3: Física del problema.....	9
Capítulo 4: Modelizar con el código Flow 3D.....	12
1. ¿Qué es Flow-3D?.....	12
2. Configuración general de una simulación.....	13
3. Características físicas de la simulación.....	14
4. Fluidos.....	15
5. Modelos 3D de la plataforma.....	16
6. Mallado.....	18
7. Probes.....	21
8. Obtención de resultados con Flow-3D.....	22
Capítulo 5 : Analisis de resultados.....	25
1. Introducción.....	25
2. Comentarios sobre el cálculo de algunos términos de las expresiones de C_d y K	25
3. Efecto del caudal.....	27
4. Efecto de la pendiente.....	32
5. Escenarios con resultados remarcables.....	38
Capítulo 6: Conclusiones.....	44
Referencias bibliográficas.....	45
Anejos.....	49
1. Anejo 1: Resultados de calados sobre el sumidero para diferentes caudales, sin pendientes transversal y longitudinal en la plataforma.....	50
2. Anejo 2: Resultados de calados sobre el sumidero para diferentes caudales, con pendiente transversal del 2% y sin longitudinal en la plataforma.....	55
3. Anejo 3: Resultados de calados sobre el sumidero para diferentes caudales, con pendiente transversal del 2% y longitudinal variable en la plataforma.....	60

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1 Introducción:

A día de hoy, más del cincuenta por ciento de la población vive en las ciudades. Las lluvias caídas sobre dichas poblaciones circulan por éstas mediante la red de calles (red superficial) y la red de alcantarillado (red subterránea), ambas comunicadas mediante decenas de miles de elementos de intercambio de flujos (sumideros). Habitualmente, las redes de alcantarillado son proyectadas para ser capaces de transportar toda la cantidad de agua que pueda precipitarse (salvo pérdidas de precipitación) sobre el área que ocupa la población para periodos de retorno de 5 ó 10 años, aunque realmente el sistema de intercambio no es capaz de absorber el 100% del agua de lluvia, ya sea porque el caudal que circula por superficie es demasiado alto, o por alguno otro motivo, como que la eficiencia de la reja del sumidero no sea suficientemente elevada. Dicho esto, aun se siguen leyendo en los periódicos noticias sobre inundaciones en ciudades, debido a que si por ejemplo se produce una lluvia de periodo de retorno superior al proyectado, ésto hace que sea físicamente imposible que el sistema de alcantarillado pueda transportar el caudal generado, y por lo tanto es importante conocer con detalle qué sucede en el momento en el que parte de este caudal es expulsado hacia la red de calles, de ahí esta investigación.

Hace unos años, después de un período de caracterización del flujo superficial por las calles (escorrentía) y del flujo subterráneo por la red de drenaje pluvial (red alcantarillado), en muchos centros de investigación, entre los que se encuentra la UPC como una de las pioneras, se empezó a estudiar la interacción entre estos dos flujos mediante los imbornales y rejas. Dichas investigaciones se basaban principalmente en caracterizar el comportamiento del flujo superficial al ser captado mediante los imbornales a pie de calle, y seguidamente ser vertido en la red de alcantarillado para pasar a formar parte del flujo subterráneo. Algunos de estos estudios también mencionaban la posibilidad de que al entrar en carga el sumidero que funcionaba de vía de comunicación entre la red superficial y la del subsuelo, esto provocaría que, en lugar de entrar flujo a través de la reja, se produjera un flujo en sentido opuesto, hacia la superficie. Para definir este hecho simplemente se argumentaba que su comportamiento era equivalente al de un fluido que sale por un orificio, considerando como coeficientes de desagüe los habituales en este tipo de tratamientos (normalmente entre 0,55 y 0,65).

Desde hace pocos años, las publicaciones referentes a este ámbito se están centrando en intentar caracterizar la salida de flujo a la superficie. Por ese motivo, la UPC está llevando a cabo una modificación de la plataforma de ensayos a escala real (1:1) que permitía cuantificar la captación y eficiencia de las distintas rejas para diferentes geometrías de calle y caudales, para adaptarla y hacer posible la experimentación de casos en los que se produzca dicho fenómeno.

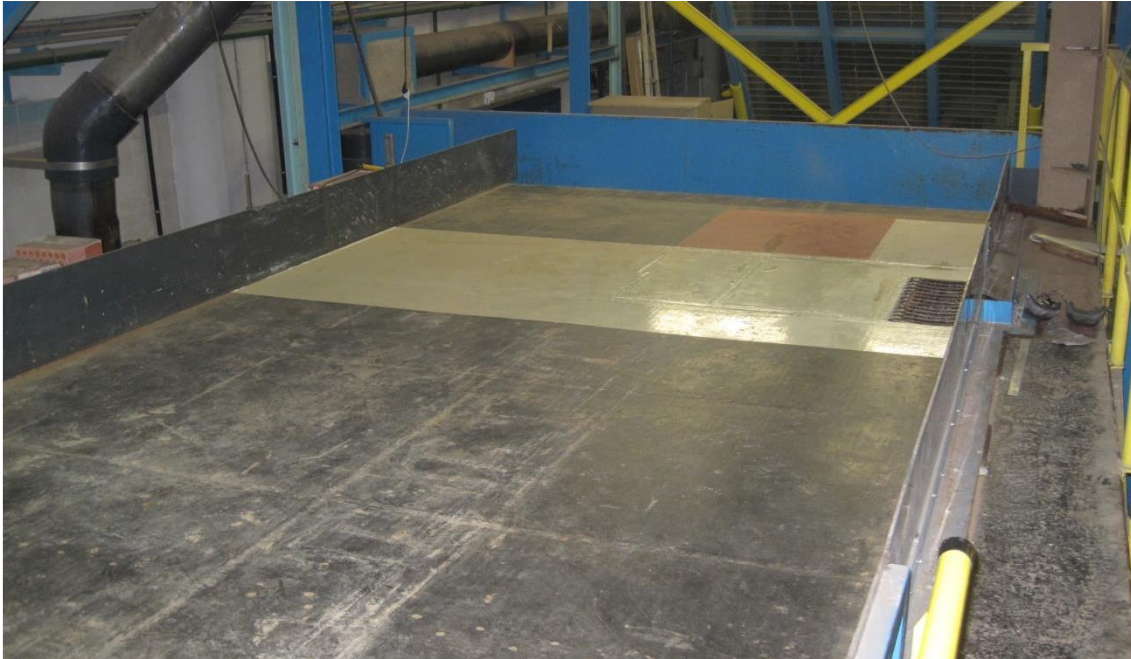


Figura 1: Plataforma de ensayos a escala real (1:1) que está construida en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona.

Antes de la ejecución de esta modificación de la plataforma, se ha considerado oportuno analizar el comportamiento del flujo mediante la modelización 3D del problema en cuestión, de cara a conocer de antemano qué posibles efectos sobre la plataforma nos podíamos encontrar en el momento de estudiar este fenómeno a escala real, ya que observaciones anteriores han mostrado la semejanza de resultados entre la realidad y la simulación.

La utilización de métodos numéricos en el ámbito de la hidráulica e hidrología están a la orden del día y cada vez hay más software que nos permiten de forma detallada simular cualquier problema, que si quisiéramos observarlo de manera real nos comportaría un gran gasto de tiempo y recursos. Desde hace tiempo, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) dispone del programa de ordenador Flow-3D, una potente herramienta de simulación de problemas de Mecánica de Fluidos, que se actualiza año tras año, y que proporciona la posibilidad de simular condiciones de flujo en tres dimensiones, a diferencia de otros que solo permiten tratamientos unidimensionales y bidimensionales.

Para definir el flujo de salida, se ha calculado el coeficiente de pérdidas localizadas que corresponde a la reja, en nuestro caso la denominada Barcelona1, y el coeficiente de desagüe de la reja, para diferentes caudales de salida y pendientes transversales y longitudinales de la plataforma.

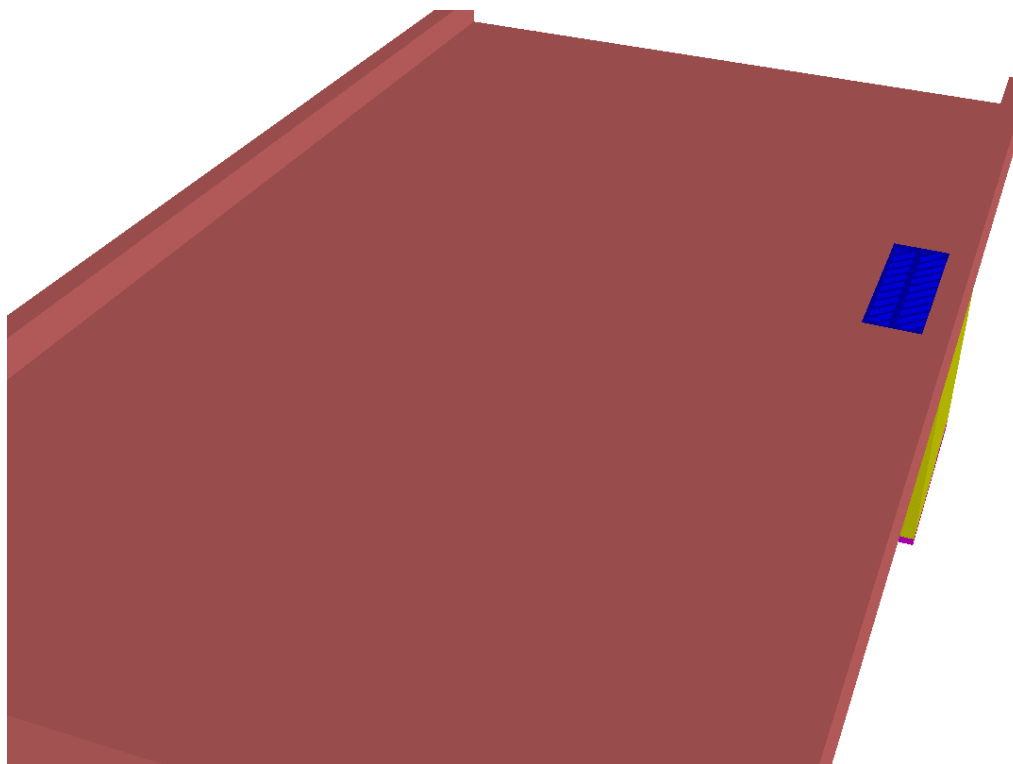


Figura 2: Modelo tridimensional de plataforma de ensayos a escala real (1:1) que está construida en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.E.C.C.P.B realizado con Flow-3D.

En la fase final de redacción de este estudio se han comenzado a ejecutar las pruebas a escala real, y se han podido realizar algunas comparaciones de resultados.

1.2 Objetivos:

El objetivo principal de este estudio es la elaboración de un modelo en tres dimensiones que reproduzca de forma correcta el fenómeno que se da en un sumidero al entrar en carga, y en caso de que el modelo físico a escala real estuviera finalizado, comparar los datos obtenidos con ambos métodos.

Una vez cumplido el objetivo principal, para realizar un análisis exhaustivo de los resultados, surgen los siguientes objetivos adicionales:

- Analizar calados de agua máximos en la salida del agua a través de la reja, para diferentes caudales y pendientes, tanto con reja como con ausencia de esta en el imbornal.
- Analizar coeficientes de desagüe (C_d) para diferentes caudales y pendientes, en el caso de presencia de la reja sobre el imbornal.
- Analizar el coeficiente de pérdidas de carga localizadas (K) que comporta la instalación de la reja, para diferentes caudales y pendientes.

Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Introducción

A la hora de revisar el estado del arte de nuestro estudio, hemos podido apreciar que especialmente sobre el fenómeno de la salida de agua de un sumidero cuando éste entra en carga, no es posible encontrar ningún artículo en el que se analice por completo el comportamiento del flujo de agua en estas condiciones. Por este motivo, se ha decidido que de cara a este capítulo se comentaran un conjunto de estudios que consideramos de mayor importancia y que tratan sobre el sistema de intercambio, es decir, de los sumideros que comunican la red de calles con la red de alcantarillado.

Respecto a las publicaciones que se analizarán, se dividirán en dos tipos, por una parte, el segmento más investigado en este campo de la hidráulica y al que pertenecen la mayor parte de las publicaciones, que es el estudio de la entrada de agua en el sumidero. Por otra parte, se hará mención a algunos artículos que tratan de una forma u otra el fenómeno de la salida de agua procedente de la red subterránea de drenaje (red de alcantarillado).

2.2 Artículos sobre el flujo de entrada a un sumidero:

Realmente este ha sido un tema muy estudiado durante los últimos años en el ámbito de la hidrología urbana. En este caso, solo se comentarán en profundidad algunos de los artículos que han utilizado como medio de indagación la ejecución de un modelo tridimensional del caso concreto de estudio.

En primer lugar, se comentará la tesina, que condujo posteriormente a la realización de un artículo, Recasens, J. (2014). En esta se elaboró un modelo tridimensional con el código Flow-3D, que reproducía la plataforma de ensayos a escala real (1:1) que está construida en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de Barcelona. Con este modelo se realizaron diversas simulaciones de entrada de agua en sumidero con la reja “Barcelona 1”, teniendo en cuenta diferentes caudales de flujo superficial y diversas combinaciones de pendientes transversales y longitudinales de la plataforma. Los datos obtenidos con dichas simulaciones y algunas características físicas de los componentes del modelo, fueron contrastados comparándolos con los obtenidos anteriormente de forma experimental en el ensayo llamado “estudio del análisis de la capacidad hidráulica de la reja barcelona1” realizado en la misma plataforma que se había modelizado.

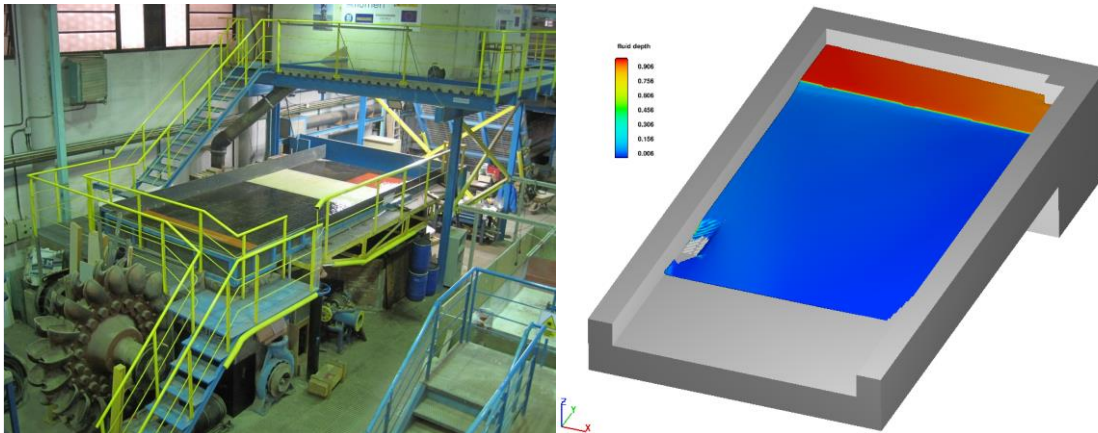


Figura 3: Representación de ensayos de captación de aguas: en la plataforma a escala real del laboratorio (izquierda) y en un modelo tridimensional de esta generado con Flow-3D (derecha).

Una de las conclusiones importantes a las que llega este estudio, es que, después de corroborar que los resultados del calado obtenidos con la modelación tridimensional, para caudales inferiores a 100 l/s, tenían un error relativo máximo no superior a 25%, siendo habitual valores de error relativo de entorno al 10%, valores muy reducidos, respecto a los resultados obtenidos en el ensayo a escala real en el laboratorio, es posible hacer uso de las simulaciones en modelos tridimensionales computarizados como alternativa a la experimentación en modelos de tamaño real. Además, estas simulaciones proporcionan algunos datos adicionales, que serían más difíciles de obtener en laboratorio.

En segundo lugar, se comentará el artículo: Djordjevic, S. et al. (2011). En este estudio se analiza el intercambio de agua entre la red de calles (superficie) y la red de alcantarillado (subsuelo), mediante ensayos de laboratorio a escala real (1:1) en las instalaciones del Water Engineering laboratory at the University of Sheffield, y por medio de unos modelos tridimensionales generados con el software OpenFOAM, calibrados mediante la medición de calados en determinados puntos del modelo real. Durante la investigación se realizan experimentaciones con diferentes pendientes tanto transversales como longitudinales de la plataforma.

Una conclusión relevante de este estudio es que garantiza que, haciendo uso de un modelo tridimensional, es posible simular la captación de agua en régimen permanente y la salida de agua desde el sumidero en régimen variable.

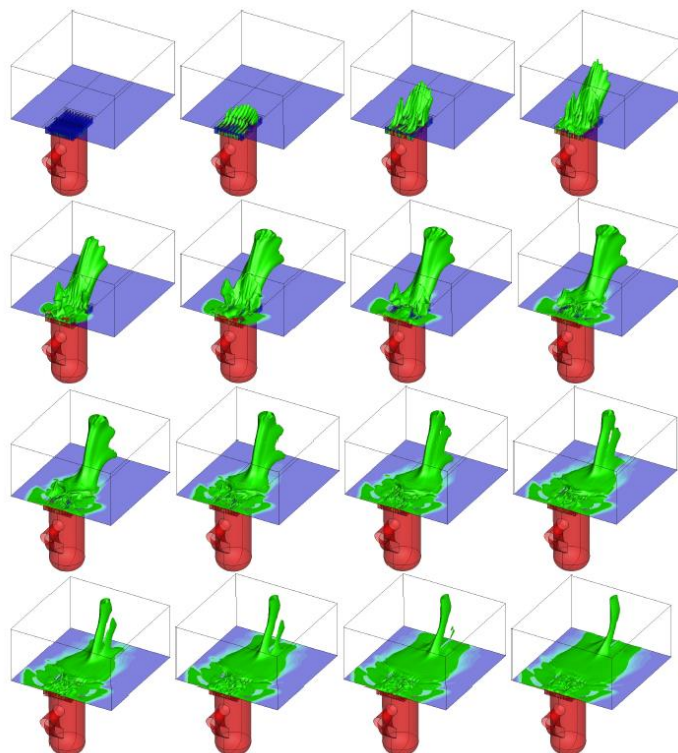


Figura 4: Representación con un modelo 3D del proceso de salida de agua de un imbornal en régimen variable.

Como es se puede observar en esta imagen extraída del propio artículo, con el modelo computarizado se simuló la salida de agua del imbornal en régimen variable, pero según comenta en parte se llevó a cabo para demostrar que el modelo era capaz de simular situaciones en las que se dieran flujos de agua más complicados.

Para concluir, también es de obligación nombrar dos textos publicados en Estados Unidos (USA). El primero, se trata de un estudio sobre el coeficiente de pérdida de carga localizada (K) generado por la reja sobre un flujo de agua entrante en el sumidero, que fue realizado por la compañía Neenah Foundry, la cual se encarga principalmente de la fabricación, mediante fundición de hierro, de tapas de alcantarilla, rejas de sumidero y elementos similares relacionados sobre todo con el ámbito de la construcción. El único inconveniente de esta indagación es que ha estado realizada para diseños de rejas de USA, que presentan en ocasiones diferencias notables comparados con los utilizados en España.

El segundo texto, es un manual para el diseño del drenaje urbano, conocido como HEC-22 (Hydraulic Engineering Circular No. 22), que fue publicado por el U.S Department of Transportation. En éste se daban unas pautas de cara a la proyección de un sistema de drenaje de una población urbana, y se hacía referencia al fenómeno de la salida de agua des del sumidero explicitando que existe una velocidad del flujo del agua que circula por superficie, que ellos llaman “splash velocity”, a partir de la cual la reja no es capaz de captar toda la cantidad de agua que la alcanza, lo que genera un caudal que sobrepasa el sumidero sin ser captado.

2.3 Artículos sobre el flujo de salida desde un sumidero:

Así como la captación de agua por sumideros e imbornales ha sido un tema muy estudiado en los últimos tiempos, el fenómeno de la salida de agua desde el imbornal es una cuestión a la no se le había dado demasiada importancia. La mayoría de artículos sobre la interacción entre la parte superior (flujo en redes de calles) y la inferior (flujo en sistema de alcantarillado) del llamado sistema de drenaje dual (DD), se centraban principalmente en el análisis de la captación de agua de las calles, y acostumbraban a hacer una pequeña mención en su parte final al suceso de la salida de agua, aunque también hay algunos que realizan un extenso tratamiento del fenómeno, pero sin obtener conclusiones muy relevantes, como la publicación: Sabtu, N. (2015). Como ya se ha comentado anteriormente, estos estudios caracterizaban la salida de flujo por la reja de un sumidero equiparando dicho fenómeno al de la salida de flujo por un orificio con coeficientes de desagüe de uso habitual (entre 0,55 y 0,65), normalmente se ejemplificaba con este esquema de Djordjevic et al., 2005:

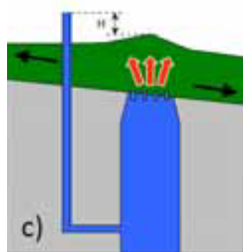


Figura 5: Representación esquemática del proceso de salida de agua de un sumidero, realizada por Djordjevic et al., 2005.

Es cierto, como se demuestra en este estudio, que se puede considerar como la salida por un orificio, lo que no es verídico es establecer este rango de coeficientes de desagüe.

Revisando artículos de los últimos años, también nos podemos encontrar con algunos más centrados en la salida de agua. En 2016, se publicó: Martins, R. et al., el cual mediante diversos modelos numéricos analiza la interacción entre el flujo que proviene de una tapa de alcantarilla que ha entrado en carga y el caudal de agua que circula en superficie. Estos modelos son validados mediante diversas experimentaciones y recogida de fotografías sobre el comportamiento del agua en este suceso.

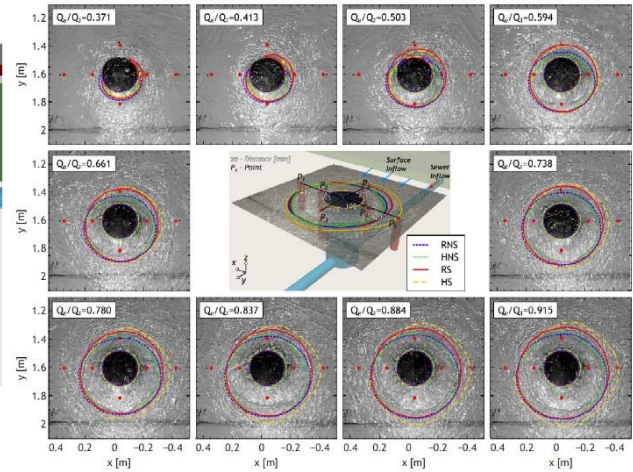
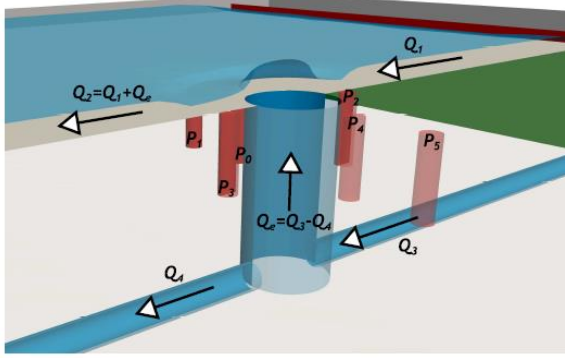


Figura 6: Esquema de cálculo de la salida de agua por la sección de una tapa de alcantarillado (izquierda) y un conjunto de fotografías de este fenómeno para diferentes caudales de salida (derecha).

Concluyendo, también es necesario mencionar un artículo que aún se encuentra en proceso de revisión: Rubinato, M. et al. (2017). En este se realiza un estudio, mediante experimentación en modelo físico, del comportamiento del agua sobre un sumidero circular y en sus proximidades en cuatro situaciones:

1. Entrada de agua en alcantarilla, sin que ésta haya entrado en carga.
2. Entrada de agua en alcantarilla, habiendo ésta entrado en carga.
3. Salida de agua desde alcantarilla, con superficie con ausencia de flujo.
4. Salida de agua desde alcantarilla, con superficie con presencia de flujo.

Estos casos se analizan para condiciones de flujo estable e inestable, principalmente mediante el análisis de coeficientes de descarga. Dicho esto, en esta investigación no se ha tenido en cuenta en ninguno de los escenarios de experimentación la posibilidad de tener presente sobre la alcantarilla una reja, como es habitual en la mayoría de las que se encuentran en cualquier ciudad.

Capítulo 3: Física del problema

Siendo nuestro objetivo el de comprender y caracterizar el flujo de salida de un sumidero al entrar en carga, se ha considerado necesario para tal tarea, realizarla en dos fases, primero definir de la forma más exacta posible la forma en la que el agua sale del sumidero tanto con reja como sin ella, y segundo, para comparar estos dos comportamientos del flujo, identificar el efecto de la reja en el modelo. Siempre realizando el análisis de los datos cuando el modelo se ha estabilizado.

Para cumplimentar la primera fase, se ha utilizado el cálculo y análisis del coeficiente de desagüe o de descarga (C_d), el cual se puede definir a partir de la expresión del caudal que sale por un orificio de la forma siguiente:

$$Q = C_d A_h \sqrt{2g \Delta h} \quad \longrightarrow \quad C_d = \frac{Q}{A_h \sqrt{2g \Delta h}}$$

Donde:

Q = caudal que se ha establecido de salida de flujo. En las simulaciones realizadas en este estudio, se ha creído necesario y posible de reproducir posteriormente en el laboratorio a escala 1:1, los caudales siguientes: 10 l/s, 20 l/s, 30 l/s, 40 l/s y 50 l/s.

A_h = área de huecos, es decir, la superficie de la sección por donde sale el flujo, en el caso de haber reja corresponde a la suma del área de cada orificio de ésta, y por lo tanto cada tipo de reja tiene un valor distinto, en el caso de la estudiada (la de la ciudad de Barcelona) este valor es igual a 0,0852 m². Para pruebas sin reja, al tener el sumidero unas dimensiones de 0,74 m de longitud y 0,26 m de anchura, la extensión de la sección es de 0,1924 m². Estos valores de extensión pueden cambiar en caso de que el flujo de agua no salga por toda la sección del sumidero.

g = valor de la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Δh = básicamente la sobreelevación que alcanza el agua al salir por el imbornal respecto la parte superior de la plataforma, teniendo en cuenta que la superficie del agua se encuentra a presión atmosférica (P_{atm}), y sin considerar el grueso de la reja.

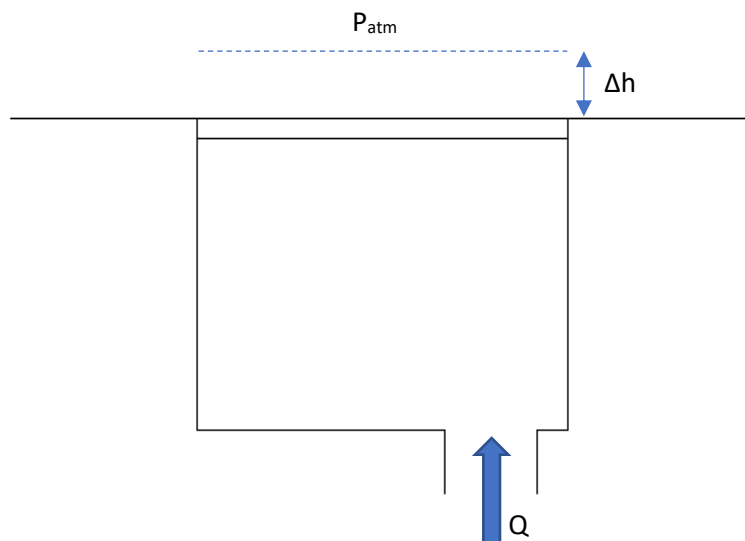


Figura 7: Representación esquemática de la salida de un caudal de agua (Q) por un imbornal generando un calado Δh sobre la sección de este.

Por lo tanto, según la definición hallada, podemos afirmar que dicho coeficiente es directamente proporcional al caudal del flujo de salida (crece si este también lo hace) e inversamente proporcional al área de huecos y al calado (decrece si estos crecen).

Este coeficiente se ha obtenido para el modelo con reja y el modelo sin ella. Después en el capítulo de resultados se explicarán las diferencias entre las dos situaciones, pero en ninguno de los casos se debería obtener un valor negativo o superior a $C_d = 1$, teniendo en cuenta que no se está tratando en ninguna ocasión como un vertedero.

El segundo es la constante que determina la pérdida de carga localizada que genera la reja (K) sobre el flujo de agua que emana del sumidero. Su valor se puede definir con la siguiente expresión matemática, que es utilizada en el campo de la hidráulica para calcular la pérdida de energía localizada que sufre el agua en situaciones puntuales:

$$\Delta H = K \frac{v^2}{2g} \quad \longrightarrow \quad K = \Delta H \frac{2g}{v^2}$$

Donde:

ΔH = diferencia de energía del agua sin presencia de reja y con ella, simplemente la diferencia de calado sobre el sumidero para las dos situaciones.

g = valor de la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

v = velocidad del flujo de agua con reja sobre el sumidero, se puede definir de la forma siguiente:

$$v = \frac{Q}{A_h}$$

Donde:

Q = caudal que se ha establecido de salida de flujo (misma definición que anteriormente)

A_h = área de huecos con presencia de la reja, que por el motivo que se ha mencionado anteriormente, puede variar

Por lo tanto, según la definición hallada, podemos afirmar que dicho coeficiente es directamente proporcional a ΔH , que debe ser una diferencia siempre positiva, y al área de huecos (crece si estos también lo hacen) e inversamente proporcional al caudal del flujo de salida (decrece si este crece).

La constante K en nuestro caso no debería superar un valor de aproximadamente $K = 3$, ni ser negativa, ya que si lo fuera nos estaría indicando algo sin sentido: la presencia de la reja aporta energía al flujo de agua. Algunos ejemplos orientativos de esta constante serían los siguientes:

Accesorios	K
Válvula esférica (totalmente abierta)	10
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2.5
Válvula de retención (totalmente abierta)	2
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.2
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$)	1.15
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$)	5.6
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$)	24.0
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-
"T" por la salida lateral	1.80
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0.90
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0.75
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0.60
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0.45
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0.40
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0.35

Figura 8: Algunos ejemplos de valores de K para componentes habituales en instalaciones hidráulicas.

Capítulo 4: Modelizar con el código Flow 3D

4.1 ¿Qué es Flow-3D?

Es un software comercial basado en volúmenes finitos desarrollado por Flow Science Inc, que pertenece al tipo llamado CFD (Computational Fluid Dynamics), y que está destinado al análisis tridimensional. Se trata de un programa con una gran cantidad de configuraciones distintas, que gracias a incorporar un entorno “multiphysics”, es utilizado para diversas aplicaciones distintas, entre las que podemos destacar la simulación de fluido en lámina libre, que es para lo que se va a utilizar en este caso.

Dentro del ámbito de la hidráulica, también es posible utilizar Flow-3D para otros objetivos, como por ejemplo:

- ✓ Hidráulica fluvial
- ✓ Hidráulica costera
- ✓ Estudios de erosión
- ✓ Depuración de aguas
- ✓ Simulación de resaltos hidráulicos

Visto el gran potencial con el que cuenta este software, es necesario y evidente comentar que en el proceso de elaboración de este estudio no se han podido aprovechar todas sus posibilidades, ya que este programa no está destinado únicamente a su uso en simulaciones relacionadas con el campo de la hidráulica, sino que también es habitual encontrarse simulaciones referentes a entornos tan diferentes como el de la energía o el de la fundición.

4.2 Configuración general de una simulación

Al crear una simulación en Flow 3D lo primero que debemos establecer es el tiempo que deseamos que tenga de duración; si por el contrario no queremos establecer un tiempo sino una condición adicional de finalización (habitualmente nos interesa que el modelo llegue a estabilizarse) es posible introducirla de manera sencilla. En esta fase de la configuración también deberemos fijar si se tratará de una simulación en lámina libre, si entraran en juego uno o dos fluidos y si estos serán considerados incompresible, y finalmente tendremos que determinar las unidades con las que queremos trabajar. Si fuera necesario contamos con un cuadro de texto donde es posible añadir algún comentario sobre la simulación.

En nuestro caso se han establecido tiempos de entre 30 y 40 segundos para los diferentes casos, y en alguna ocasión se ha establecido la condición adicional de estabilidad de cara a una posible reducción del tiempo de ejecución. Asimismo, se ha fijado que se trabajará con lámina libre de agua, con un único fluido incompresible y con las unidades de medida del Sistema Internacional y la temperatura en Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Ejemplo:

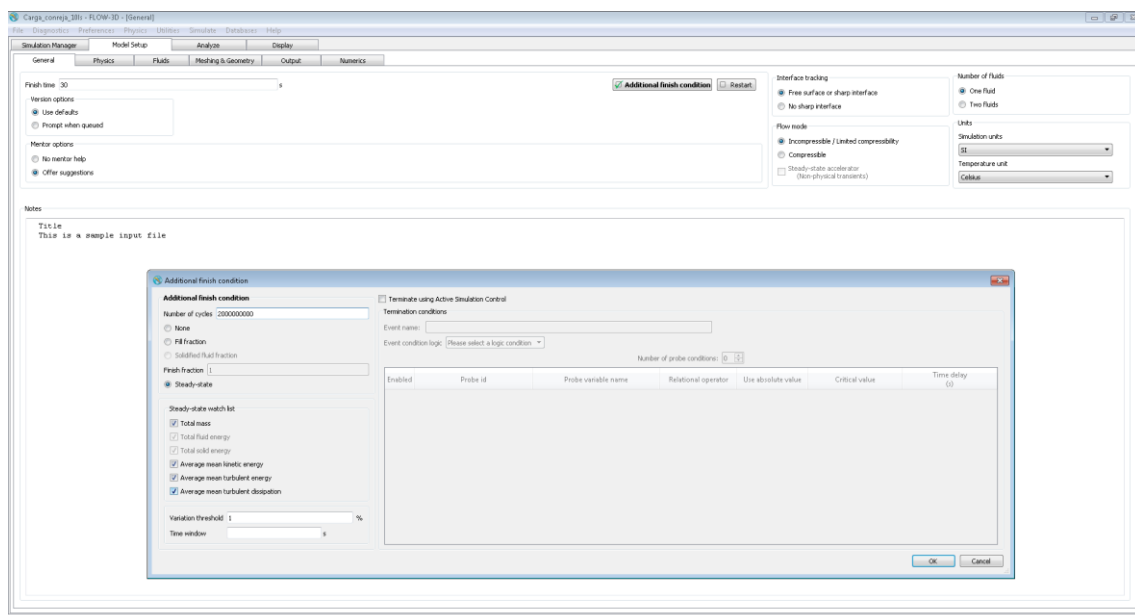


Figura 9: Captura de pantalla de la ventana de configuración general de una simulación en el software Flow-3D.

4.3 Características físicas de la simulación

El código de Flow 3D nos permite añadir una serie de condicionantes físicos de cara a que se tengan en cuenta en el momento de llevar a cabo la simulación. Entre ellos destaca por ejemplo la posibilidad de añadir burbujas de aire, cambios de fase, cavitación, establecer la gravedad en cualquier dirección, tensión superficial o también viscosidad y turbulencia de fluido presente en el estudio.

Para nuestro modelo, solo se ha fijado que se trata de un fluido con viscosidad y se ha determinado la dirección de la gravedad, que se ha ido variando para los diferentes casos de estudio, para representar los cambios de pendiente de la plataforma (este hecho se explicará detalladamente más adelante).

Ejemplo:

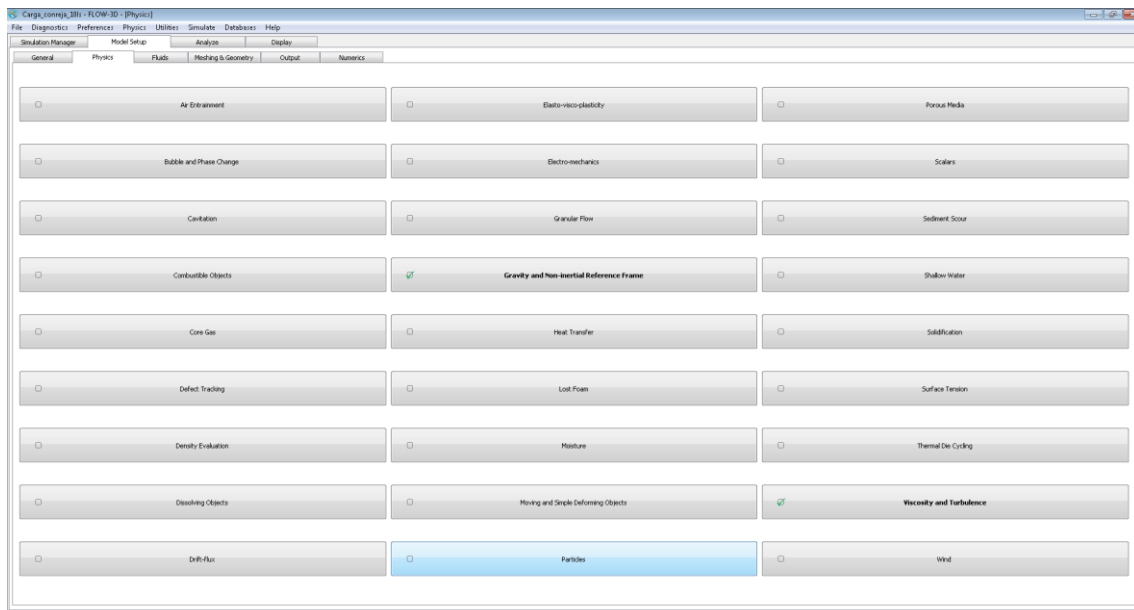


Figura 10: Captura de pantalla de la ventana de selección de características físicas de una simulación en el software Flow-3D.

4.4 Fluidos

En nuestro modelo el único fluido que interviene es el agua a 20 °C, pero en otros casos donde nos resulta necesario simular más de uno, o incluir burbujas de aire, podríamos introducir manualmente en el programa las propiedades de dichos elementos, o bien, tal y como se ha hecho en nuestro caso, buscar el material que queremos utilizar en la simulación en la base de datos de Flow-3D; una vez encontrado, solo debemos añadirlo, y se nos rellenarán todos los campos referentes a sus propiedades.

Ejemplo:

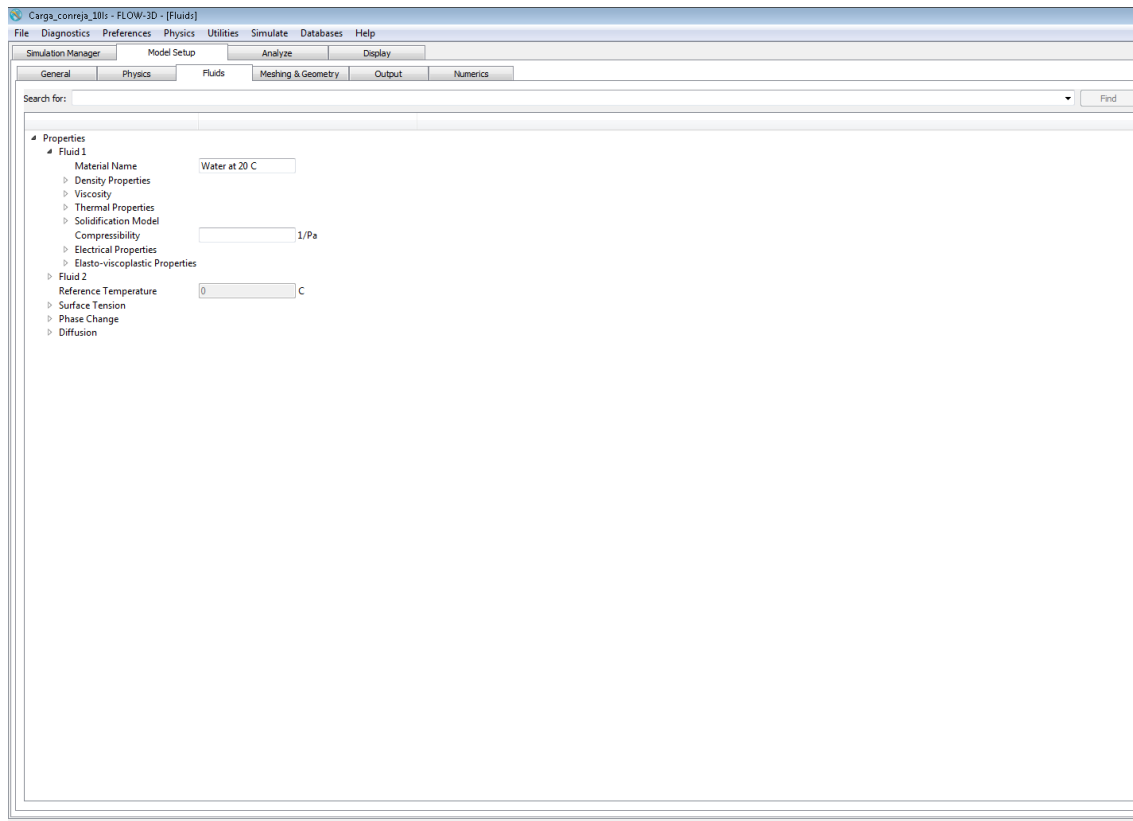


Figura 11: Captura de pantalla de la ventana de configuración de los fluidos que intervienen en una simulación en el software Flow-3D.

4.5 Modelos 3D de la plataforma

Para nuestro estudio, se ha creído necesario simular parte de un segmento de una calle que cuenta con un sumidero. Este modelo se ha dividido en los siguientes elementos de geometría 3D para introducirlo en el software de Flow 3D:

1. Plataforma: representa la superficie de la calle que se está simulando, y por lo tanto, cuenta con una parte central por donde circularían los vehículos, unos bordillos de 0,15m de altura a ambos lados en dirección transversal y una obertura en uno de sus lados, que representa el sumidero.
2. Reja: se trata simplemente de la reja que cubre el sumidero, en este caso se ha utilizado el modelo que se instala las calles de la ciudad de Barcelona.
3. Arqueta: cavidad por la que circula el agua (en caso de que el sumidero entre en carga) antes de salir por la reja hacia el exterior, su sección es exactamente igual a que define la reja, y cuenta con un agujero circular en la parte inferior, que simula una tubería de diámetro 0,20m que conectaría nuestro sumidero con el resto del sistema de alcantarillado.
4. Tapa inferior arqueta: es un elemento geométrico puramente adicional que se ha utilizado para que la simulación se ejecute correctamente, evitando que parte del fluido producido por la fuente de masa se escape del elemento "Arqueta" por su orificio inferior.
5. Fuente de masa: representado por un cilindro situado en el interior del hueco inferior de la "Arqueta", simula un sólido que es capaz de producir el caudal que se le especifique por todas las caras no obstruidas.

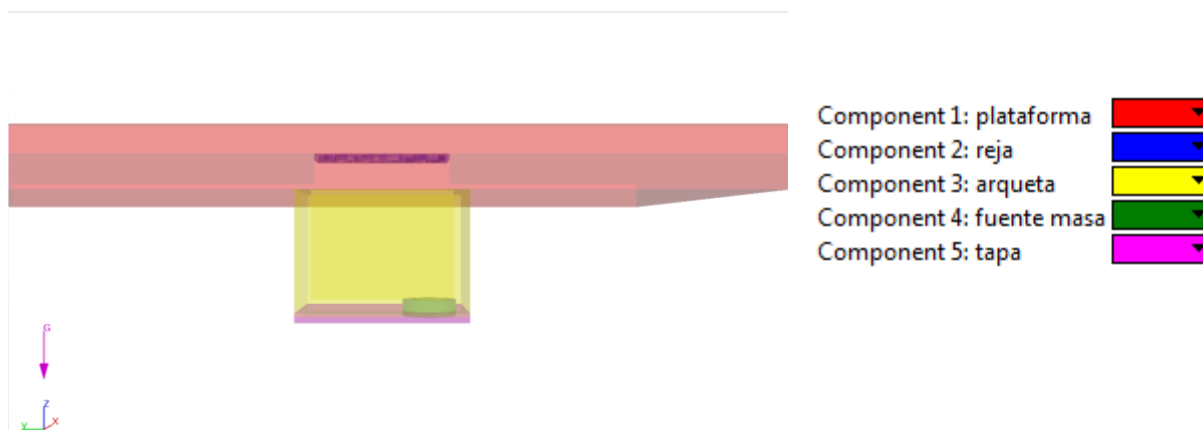


Figura 12: Representación de los diferentes componentes que forman parte del modelo tridimensional utilizado en las simulaciones de Flow-3D.

Estos elementos, excepto la denominada "Fuente de masa" que se ha generado mediante el propio software de simulación, han sido elaborados en formato ".stl" mediante el software de diseño por ordenador: Sketchup 2017. Se ha decidido utilizar este programa de ordenador por delante de otros como Autocad, por su sencillez, fácil manejo y capacidad de exportar archivos rápidamente a la extensión de archivos ".stl". Posteriormente estos elementos se han refinado para su inserción en el modelo con la herramienta "adqmesh" de Flow 3D.

Los diferentes elementos han sido situados en el espacio formando el modelo completo de la simulación, según un origen de coordenadas, con sus ejes situados de la forma siguiente:

Modelación mediante un código 3D de la salida de agua desde el alcantarillado a la calle a través de un sumidero

- Eje X: transversal a la plataforma, paralelo a 0,10 m del borde más bajo en la dirección longitudinal y localizado en la superficie de esta, orientado en el sentido opuesto del lateral donde se encuentra el sumidero.
- Eje Y: longitudinal a la plataforma, paralelo al bordillo a 0,10 m del extremo de esta y en su superficie, orientado en el sentido opuesto al de la pendiente descendiente de la calle.
- Eje Z: perpendicular a la plataforma, localizado en planta en la intersección de los dos ejes anteriores y con sentido ascendente.

A cada componente de nuestro modelo tridimensional es posible asociarle una rugosidad superficial (valor de rugosidad absoluta según el material). En el caso de la fuente de masa, no es necesario, ya que representa el elemento que produce el caudal de agua. Respecto a los otros elementos del modelo, se les debe dotar de una rugosidad, pero según el estudio: “Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero” de Juan Recasens Vargas, el efecto de esta propiedad en los componentes del sistema de intercambio (reja, arqueta y tapa inferior arqueta) tiene poca importancia en los resultados de la simulación, y como nuestro estudio es principalmente en este sistema, el valor de la rugosidad para el elemento plataforma, también resulta poco relevante. Por este motivo se ha decidido establecer como rugosidad absoluta: 0,0005, para todos los componentes donde era necesario, ya que se trata de un valor habitual para este tipo de estudios de fenómenos hidráulicos, y comprobado en estudios previos en la misma plataforma.

4.6 Mallado

Dentro del modelo tridimensional que hemos introducido en Flow-3D, para nuestra indagación, no es necesario simular el comportamiento del flujo de agua en toda la plataforma. Por ese motivo en este software es necesario delimitar el espacio de cálculo mediante bloques de malla que se adapten a la geometría del modelo y que tengan una paso de malla suficientemente reducido como para poder observar con detalle por donde circula el fluido, pero no demasiado, ya que esto con llevaría un aumento considerable del tiempo de cálculo de nuestra simulación.

Para nuestras simulaciones, se ha considerado necesario el uso de dos bloques de malla:

- **Bloque 1:** este bloque comprende desde la parte inferior de la plataforma hasta 0,5 m por encima de la superficie de ésta. En cuanto a su extensión en los ejes X e Y, solo alcanza algunos centímetros más que la sección del sumidero. Para el paso de malla, se ha considerado que sea de 0,02 m, y contiene una porción del bloque 2 anidada, es decir, comprendida en su interior. También cuenta con algunos planos de malla adicionales a los que delimitan el propio bloque: dos planos que coinciden con los que delimitan el bloque 2 en el eje Y, un plano en la superficie de la plataforma, y un plano que corresponde al extremo interior del bordillo de la plataforma.
- **Bloque 2:** este bloque comprende desde la tapa inferior de la arqueta hasta 0,5 m por encima de la superficie de la plataforma. En cuanto a su extensión en los ejes X e Y, es igual a la que corresponde a las dimensiones de la arqueta. Respecto al paso de malla, se ha considerado establecerlo en 0,01 m según se aconsejaba en el artículo: “Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets” de Manuel Gómez et al., y como ya se ha comentado, la parte superior de este bloque está anidada al bloque 1. También cuenta con algunos planos de malla adicionales a los que delimitan el propio bloque: un plano situado en el extremo interior del bordillo de la plataforma y otro en la superficie de esta.

Algunos comentarios sobre las características de los bloques de malla:

La relación de pasos de malla entre bloques, como se puede observar, es de 1:2, ya que en el manual de Flow-3D se recomienda que para bloques anidados se establezca así y que el mallado sea coincidente en los puntos de interacción de dichos bloques.

El motivo de añadir los planos de malla adicionales, antes comentados, es que, según se recomienda también en el manual de este software para un correcto mallado, se deben introducir estos planos en lugares de coincidencia de bloques anidados y en planos determinados por la geometría tridimensional, que queden en el interior de bloques de malla.

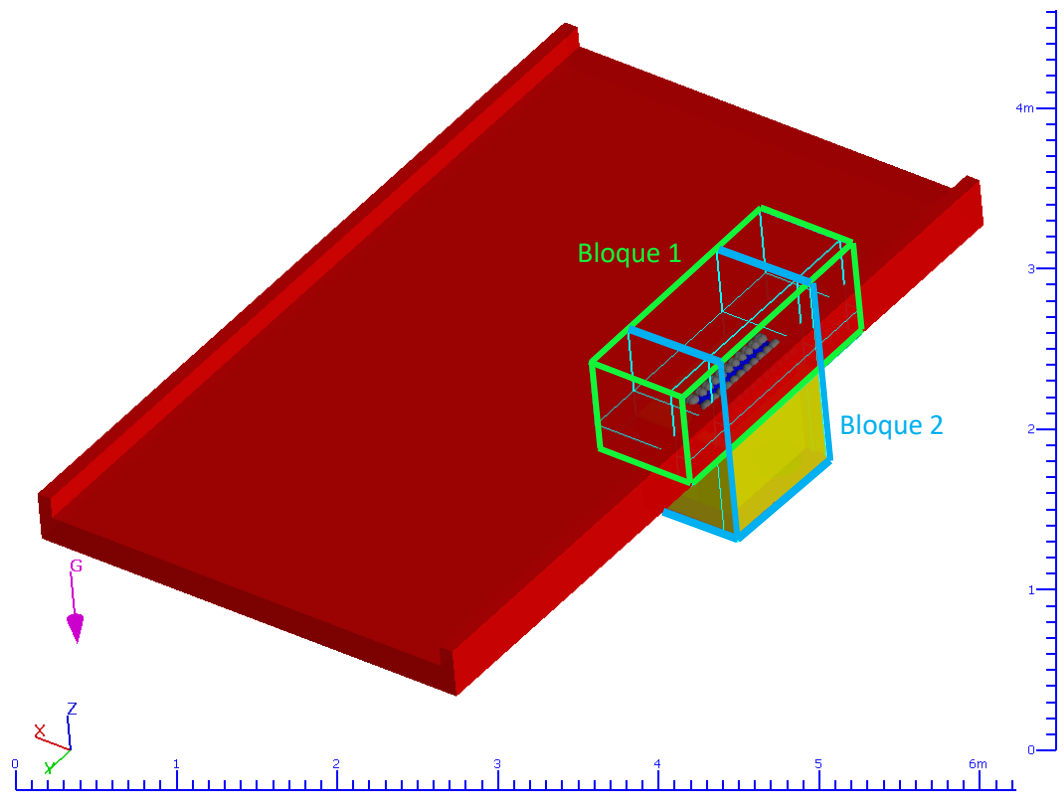


Figura 13: Representación de los dos bloques de malla que han sido utilizados para llevar a cabo las simulaciones de Flow-3D.

Cuando creamos un bloque de malla, el programa nos permite determinar sus condiciones de contorno, es decir, cómo queremos que se comporten los planos que delimitan cada bloque de malla. Este software nos proporciona varias opciones a elegir, desde que el plano funcione como un muro (opción “Wall”), impidiendo el paso del fluido, hasta que se comporte dejando pasar el fluido sin interferir sobre el en ningún aspecto (opción “Outflow”). En la imagen siguiente se pueden apreciar todas las opciones disponibles. En nuestro modelo, hemos considerado definir todos los planos con la condición de contorno: “Outflow”, a excepción del plano inferior en el eje Z del bloque 2, que se utilizó la opción: “Symmetry”, que simplemente deja que el flujo se vea limitado únicamente por la geometría 3D del modelo.

Mesh block 1: Block 1 [X Min Boundary]

Boundary type

☐ Symmetry ☐ Continuable ☐ Specified pressure ☐ Grid overlay ☐ Wave
☐ Wall ☐ Periodic ☐ Specified velocity ☒ Outflow ☐ Volume flow rate

☐ Allow fluid to enter at outflow boundary

☐ Pressure Pa
☒ Stagnation pressure

☐ Wave absorbing layer

Length m
 Damping coefficient at wave approach face 1/s
 Damping coefficient at boundary 1/s
 Background stream velocity User prescribed
 Stream velocity in X 0 m/s
 Stream velocity in Y 0 m/s
 Stream velocity in Z 0 m/s
 Time scale Code calculated s

☐ Density kg/m³
☐ Volume fraction of entrained air
☐ Alloy solute concentration kg/m³
☐ Dissolved solute concentration kg/m³
☐ Dispersed phase drop diameter m

☐ Non-condensable gas volume fraction 0
☐ Relative saturation 0

☐ Sediment
☐ Scalars

☐ Electric Charge Coul/m³
☐ Specified potential boundary
☐ Electric potential kg-m⁻²/Coul/s²

Use fluid fraction
☐ Fluid fraction 1
☒ Fluid elevation -1,0e+10 m
☒ Rating Curve m
☐ Natural inlet, automatic flow regime
☐ Natural inlet, sub-critical flow
☐ Natural inlet, super-critical flow
☐ Natural inlet, critical flow
 Min. elevation:
 Max. elevation:

☐ Turbulence quantities ☐ Thermal information

OK Cancel

Figura 14: Captura de pantalla de la ventana de selección de las condiciones de contorno para cada uno de los planos que componen un bloque de malla en el ámbito de una simulación en el software Flow-3D.

4.7 Probes

Las probes son unos puntos que puedes añadir al modelo a simular, con el objetivo de que en sus localizaciones, el programa te proporcione unos resultados detallados de las diferentes variables físicas que se le hayan seleccionado para que las vaya recogiendo durante el transcurso de la simulación. En la correspondiente a nuestra investigación se han introducido 65 probes divididas en secciones transversales de 5 probes cada una, con un total de 13 secciones, para obtener una especie de cuadrícula de datos sobre la sección del sumidero y reja. En la imagen siguiente se pueden ver las probes representadas como pequeñas esferas, pero realmente la localización exacta de la probe es únicamente el centro de cada pequeña bola.

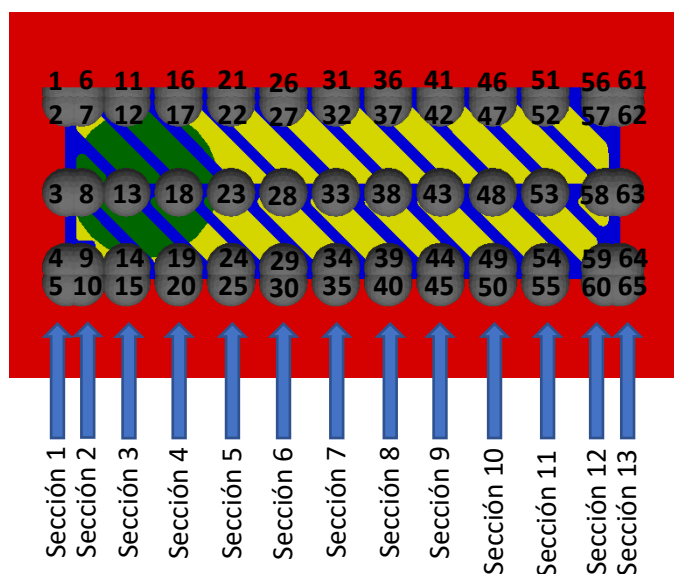


Figura 15: Esquema de la situación de las diferentes secciones transversales de probes sobre la sección del sumidero utilizadas en las simulaciones con Flow-3D.

4.8 Obtención de resultados con Flow-3D

Un problema generalizado de mecánica de fluidos está constituido por un sistema de 17 ecuaciones y 17 incógnitas. Tratando de reducir el número de ecuaciones, es posible utilizar las propuestas por Navier-Stokes, que son una versión simplificada del balance de la cantidad de movimiento, expresadas en función de la presión ($p(\vec{x},t)$) y del campo de velocidades ($v(\vec{x},t)$). Después de esto, el problema queda determinado simplemente con un sistema de 4 EDP's y 7 incógnitas, en el que si también consideramos como hipótesis que nuestro fluido es barotrópico, es decir, que su densidad solo depende de la presión ($\rho(p)$) y la temperatura no interviene como variable independiente, podemos desacoplar la parte térmica de la mecánica, obteniendo finalmente el problema mecánico, que queda definido de la forma siguiente:

$$\nabla \cdot p + \mu \Delta \vec{v} + \rho \vec{b} = \rho \frac{d\vec{v}}{dt} \longrightarrow \text{Balance cantidad de movimiento (Navier Stokes)}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \longrightarrow \text{Continuidad}$$

Donde:

$\nabla \cdot p$ = Fuerzas originadas por el gradiente de presiones.

$\mu \Delta \vec{v}$ = Fuerzas viscosas.

$\rho \vec{b}$ = Fuerzas másicas (en caso de no tenerse en cuenta la fuerza de Coriolis, b = aceleración de la gravedad)

$\rho \frac{d\vec{v}}{dt}$ = Fuerzas de inercia ($\frac{d\vec{v}}{dt}$ = aceleración expresada como derivada material de la velocidad)

$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}$ = Determina la dilatación, mediante la divergencia de la velocidad. Si su valor fuera negativo indicaría compresión, mientras que si fuera positivo denotaría un aumento de volumen. Al ser para nosotros nula denota incompresibilidad.

En nuestro caso también se ha supuesto fluido newtoniano incompresible, asumiendo:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \longrightarrow \rho = \rho_0$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \longrightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = Tr(\vec{d}) = 0$$

Comentario sobre notación: los caracteres con una flecha sobre ellos, son vectores con actuación en las tres dimensiones del espacio.

Con lo visto hasta ahora, nos encontramos con que es posible resolver el problema para un flujo laminar hallando la solución de un sistema de cuatro ecuaciones expresadas de forma compacta (Navier Stokes y Continuidad) y 4 incógnitas ($p(\vec{x},t)$ y $v(\vec{x},t)$).

No obstante, Flow-3D de cara a resolver el problema presenta este sistema de ecuaciones de forma no compacta y con inclusión de algunos términos adicionales. Tratándose de un sistema

determinado es posible su resolución, pero al tener tal complejidad, solo podría ser viable en cuanto a coste computacional encontrar una solución en casos con flujos laminares.

En cuanto a los casos donde tenemos régimen turbulento, Reynolds realizó una serie de estudios de turbulencia, que le hicieron llegar a la conclusión de que en determinados casos se producían rápidas fluctuaciones en la velocidad. Si quisiéramos considerarlas deberíamos tener una malla de cálculo muy fina, lo cual comportaría un alto coste. Por lo tanto, para flujos turbulentos debemos llevar a cabo un tratamiento singular debido a la dificultad que conlleva su caracterización con las ecuaciones de Navier Stokes. Para esto, es necesario el uso de los modelos de turbulencia, que básicamente se encargan de definir los valores medios de los campos de velocidades y presiones, dejando a un lado las fluctuaciones, de forma que sea posible obtener unas ecuaciones de gobierno en función de estos.

Con la introducción de estos valores medios y un término llamado de tensiones turbulentas o de Reynolds, en las ecuaciones de Navier Stokes, es posible obtener las ecuaciones tipo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), que hacen que ahora nuestro sistema sea de 4 ecuaciones y 7 incógnitas, definiendo el problema de cierre de las ecuaciones de Reynolds de la forma siguiente:

$$-\vec{\nabla} \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_R + \rho \vec{b} = \rho \frac{d\bar{v}}{dt}$$

Donde:

\bar{p} y \bar{v} = Valor medio de las presiones y valor medio de las velocidades

$\vec{\tau}_R$ = Tensor de Reynolds (contiene 6 nuevas incógnitas)

$\vec{\nabla} \cdot \vec{\tau}_R$ = Término de tensiones turbulentas o de Reynolds

Para su resolución, Boussinesq planteó que si se consideraba la existencia de la viscosidad turbulenta (ν_T), debe haber un gradiente que la relacione con el tensor de Reynolds, de forma que se puede definir nuevamente el problema de la manera siguiente:

$$-\vec{\nabla} \bar{p} + \mu \Delta \bar{v} + \rho \nu_T \Delta \bar{v} + \rho \vec{b} = \rho \frac{d\bar{v}}{dt}$$

De modo que los diversos modelos de turbulencia de este software, tratan de obtener el valor de la viscosidad turbulenta.

Resolución Flow-3D:

Resuelve las ecuaciones con aproximación numérica, exactamente con el método de los volúmenes finitos (diferencias finitas en las tres direcciones del espacio).

Ofrece diversas opciones a la hora de configurar la resolución numérica que se desea ejecutar, como por ejemplo la posibilidad de escoger entre modelos numéricos de resolución de primer orden o de segundo orden, los cuales ofrecen mayor precisión de cálculo.

Dentro del programa son de destacar dos métodos que ayudan a que el mallado del modelo sea más eficiente, reduciendo el tiempo de cálculo del ordenador. Son los siguientes:

- ❖ **FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation):** este método se basa en el cálculo del ratio de área y volumen de cada celda, de forma que si queremos representar objetos que contienen líneas curvas, al estar utilizando un mallado basado en cuadriláteros, no es necesario establecer un paso de malla muy fino, ya que el propio programa puede determinar el área y volumen de la celda en los que debe tener en cuenta que existe un obstáculo y los que no. Esto permite mayor rapidez en la creación de la malla, y la posibilidad de que el modelo pueda cambiar dentro de esta sin que esto comporte una modificación de la misma.

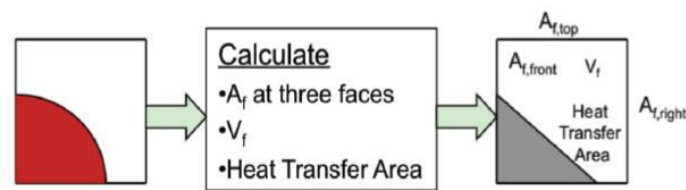


Figura 16: Esquema del método FAVOR.

- ❖ **VOF (Volume of Fluid):** se trata de un método que deriva del anterior, se utilizada para determinar la superficie libre, que es la que determina el límite entre el espacio donde el software debe resolver las ecuaciones y el que no (vacío). Esto permite menor coste computacional, y la posibilidad de que esta superficie puede variar respecto al tiempo y al espacio sin representar un cambio en el mallado.

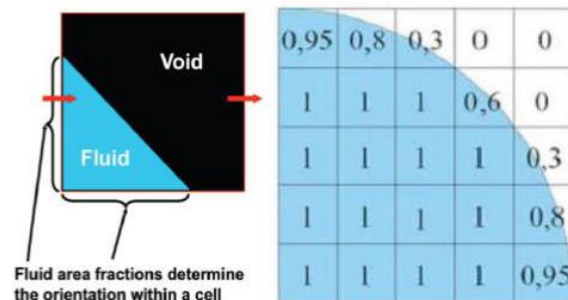


Figura 17: Esquema del método VOF.

Capítulo 5: Análisis de resultados

5.1 Introducción

Para poder comprender cómo se comporta el flujo de agua al salir del sumidero, de la manera más detallada posible, se ha considerado estudiar un conjunto de casos según tres criterios relativos tanto al propio flujo como a la geometría del modelo:

1. El caudal de agua que sale por el imbornal (valores simulados: 10 l/s, 20 l/s, 30 l/s, 40 l/s y 50 l/s)
2. La pendiente transversal de la plataforma (pendientes simuladas: 0% y 2%)
3. La pendiente longitudinal de la plataforma (pendientes simuladas: 0%, 2%, 4%, 6%, 8% y 10%).

De cara a analizar los resultados, se han establecido dos grupos de casos que se han considerado que pueden ser comparables entre ellos:

- a) Casos con pendiente longitudinal igual a 0%
- b) Casos correspondientes a pendientes transversales del 2%.

En este capítulo, los resultados se mostrarán en forma de tablas resúmenes o de gráficos. Si se desea observarlos con más detalle es posible hallarlos al completo en los anejos.

5.2 Comentarios sobre el cálculo de algunos términos de las expresiones de C_d y K :

Referentes a C_d :

A_h : analizando algunos casos en los que el modelo estaba caracterizado por un bajo caudal de salida y una pendiente longitudinal elevada, se ha detectado en las simulaciones que de forma ocasional, la lámina de agua obtenida sobre la plataforma no cubría la totalidad de la sección perteneciente al imbornal. Dado este fenómeno, se ha decidido calcular lo que nosotros llamaremos “área de huecos efectiva”. El cálculo de este término nos permite que en el momento de obtener el coeficiente de desagüe (C_d), el área de huecos utilizada en la expresión mencionada anteriormente corresponda únicamente a la superficie de huecos de la sección del sumidero por la que se produce salida de flujo de agua.

La metodología seguida para la obtención de su valor en cada uno de los escenarios simulados, se ha basado principalmente en calcular el tanto por ciento del área total del imbornal que en estado estacionario del flujo estaba cubierta por la lámina de agua. Para ello se ha utilizado el conjunto de probes (puntos de toma de datos) que se mostró en el esquema del modelo tridimensional del capítulo 4 en el que también se señalaban las secciones transversales, con la finalidad de crear una cuadrícula de resultados de alturas de agua sobre la superficie ocupada por el sumidero, considerando que cada probe representa un porcentaje de esta área. De esta forma, si el dato referente al calado mostrado por una probe era negativo o igual a 0, se entendía que en ese punto no se estaba produciendo flujo de salida, y por lo tanto el área de huecos representada por dicha probe debía ser restada al valor del área de huecos total. En las Modelación mediante un código 3D de la salida de agua desde el alcantarillado a la calle a través de un sumidero

simulaciones donde la sección del imbornal está cubierta con la reja, se restaría al valor del área de huecos especificada para dicho tipo de reja, y en el caso de no estar presente este elemento en el modelo, simplemente se debería restar a la superficie total de la sección del sumidero.

Δh : la obtención de este término se ha fundamentado esencialmente en el cálculo de una media ponderada de los valores de altura de agua proporcionados por las probes situadas sobre el sumidero. Para dicha ponderación, se ha tenido en cuenta que cada probe tenía un área de influencia respecto a la sección total del imbornal, es decir, dada la cuadrícula de resultados que se ha comentado anteriormente, se ha considerado el dato proporcionado por cada punto de medición como calado constante en la extensión de la superficie definida por el producto de los valores correspondientes a la mitad de la distancia mínima a las 2 probes más cercanas.

En la siguiente figura es posible observar una porción de la cuadrícula generada por todas las probes, y algunas de las áreas de influencias más importantes en la misma zona sobre la sección del sumidero. En este caso se han mostrado las relativas a las probes 47, 52, 53, 57 y 58. En la imagen no se han representado algunas con difícil visualización por su tamaño.

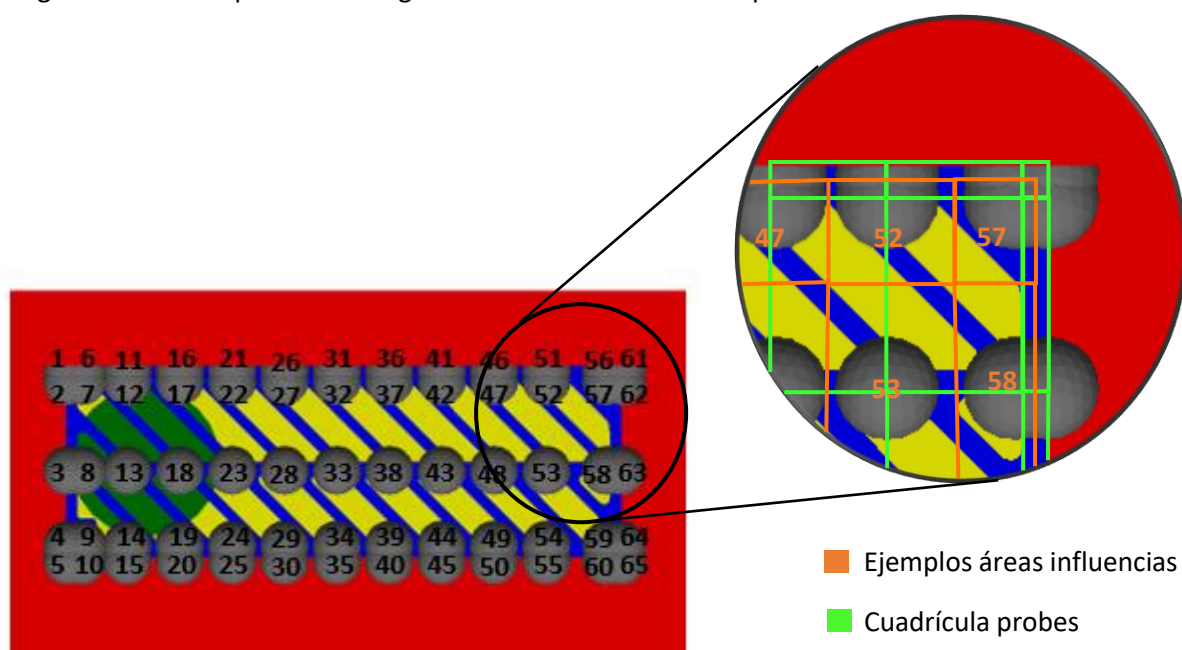


Figura 18: Esquema áreas influencia para cálculo de calado medio sobre el sumidero.

En los escenarios donde la superficie del imbornal no se encontraba totalmente cubierta por el flujo de agua, solo se han considerado las probes que proporcionaban un resultado de altura de agua de valor positivo. En referencia al area total a considerar en estos casos, se ha considerado calcularla como la suma de las areas de influencia de las probes que registran flujo de salida.

Referentes a K:

ΔH : para un mismo caudal, se ha restado el Δh calculado sin reja menos el Δh calculado con reja, siguiendo en ambos casos los criterios mencionados en el apartado anterior. En alguna ocasión, sobre todo con caudales reducidos, se han obtenido algunos valores negativos, y más tarde se comentará el motivo de este hecho que es imposible.

5.3 Efecto del caudal:

Para evaluar cómo se ven modificados los resultados de las simulaciones por la variación del caudal de salida, nos centraremos principalmente en el análisis del caso de estudio en el que la plataforma no cuenta ni con pendiente transversal ni longitudinal, ya que se trata del caso más estable en cuanto a resultados. Esto es debido al hecho de que éstos solo pueden ser alterados por dos factores: el caudal de salida y la ausencia o presencia de la reja sobre el imbornal. Además, en todos los escenarios simulados para esta configuración de pendientes, el sumidero queda totalmente cubierto por la lámina de agua al llegar al estado estacionario. En las siguientes imágenes podemos ver algunos ejemplos:

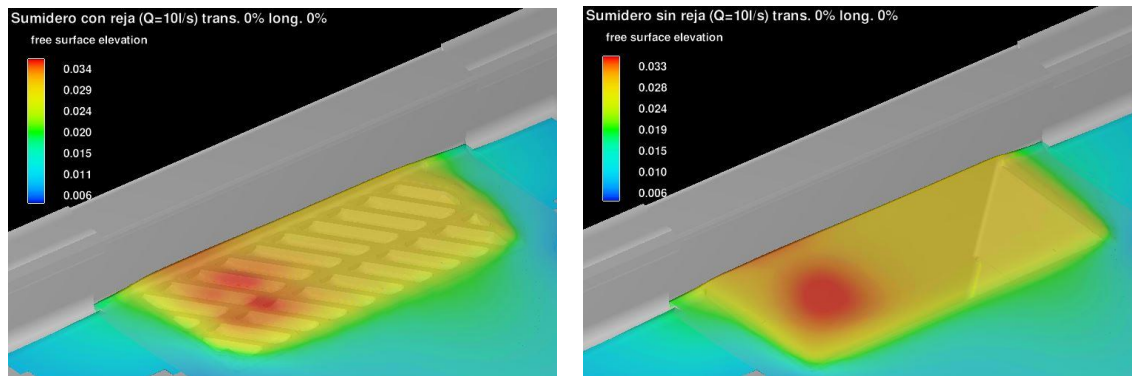


Figura 19: Representación tridimensional del calado sobre el imbornal con flujo de salida de 10 l/s en estado estacionario y sin pendientes longitudinal y transversal, tanto con reja (izquierda) como sin ella (derecha).

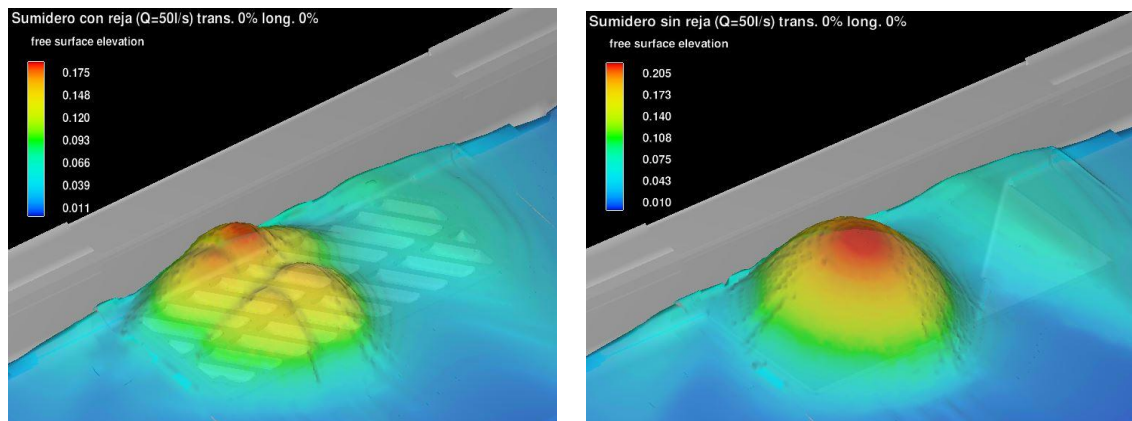


Figura 20: Representación tridimensional del calado sobre el imbornal con flujo de salida de 50 l/s en estado estacionario y sin pendientes longitudinal y transversal en estado estacionario, tanto con reja (izquierda) como sin ella (derecha).

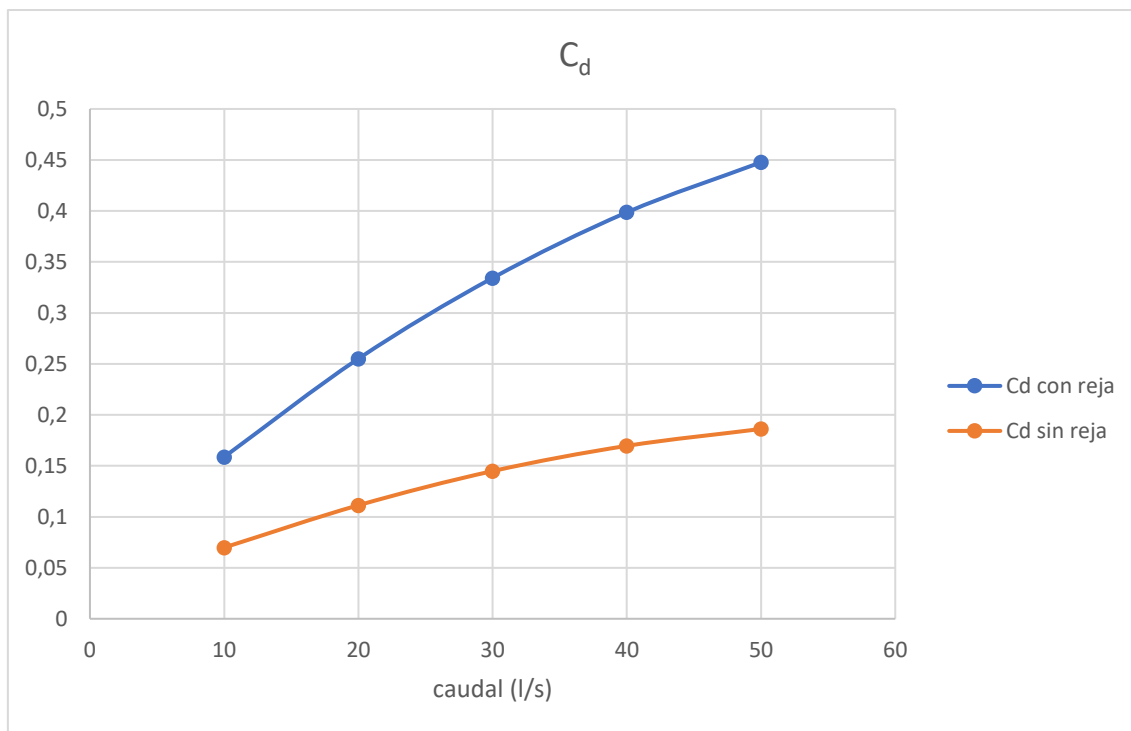


Gráfico 21: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con el aumento del caudal de salida sin pendientes en la plataforma, con reja y sin ella.

Con este gráfico en el que se representan diversos valores del coeficiente de desagüe en función del caudal de salida, es posible observar diversos sucesos importantes en el comportamiento del agua. Primeramente y más evidente, es el hecho de que los coeficientes de desagüe para flujos de salida de sumideros con reja son más elevados que los obtenidos con sumideros sin reja. Esto es debido a que, como se ha comentado en el capítulo 3, el área de huecos (A_h) y el calado medio sobre el imbornal (Δh) son inversamente proporcionales a C_d , y como ambos son mayores en escenarios sin reja que con reja, de ahí los datos obtenidos:

Tabla 22: Valores de C_d máximos y mínimos para escenario sin pendientes.

Pend. trans. = 0% Pend. long. = 0%	Valor mínimo (10l/s)	Valor máximo (50l/s)
C_d con reja	0,159	0,448
C_d sin reja	0,070	0,186

En segundo lugar, también es posible observar que el aumento de caudal genera un mismo comportamiento en el valor del coeficiente de descarga, aunque en el caso con reja la pendiente de crecimiento es mayor que en el caso sin reja. No obstante, a medida que el valor del caudal de salida crece, la pendiente del crecimiento del C_d va poco a poco disminuyendo.

Según los resultados mostrados en la Tabla 1, los valores de C_d con reja estarían en el intervalo entre 0,16 y 0,45, mientras que el C_d sin reja pertenecería al formado entre 0,07 y 0,19. En ninguna de las dos situaciones se consiguen alcanzar resultados de la magnitud de 0,55 o 0,6,

que eran los que se mencionaban en algunos de los estudios mostrados en el Capítulo 2: Estado del arte, ni si quiera con caudales tan elevados como 50 l/s, difícilmente observables en situaciones reales que puedan suceder en las calles de ciudades como Barcelona. Incluso sería posible garantizar que difícilmente se obtendrían coeficientes de desagüe de tal envergadura para caudales más elevados a los tratados en este estudio.

Haciendo referencia a la constante de pérdidas de carga localizadas (K), obtenemos la siguiente representación gráfica para el escenario sin pendientes en la plataforma:

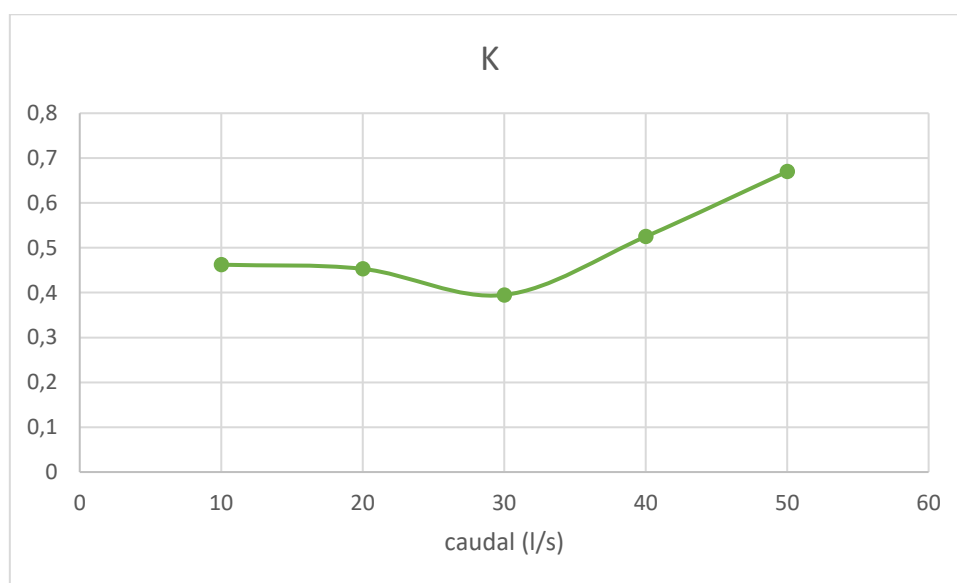


Gráfico 23: Representación de la evolución de la constante K con el aumento del caudal de salida sin pendientes en la plataforma.

En este caso el comportamiento del gráfico nos muestra que al aumentar el caudal, el valor de K sufre dos fases diferentes, una primera de decrecimiento entre 10 l/s y 30 l/s, y seguidamente una segunda de crecimiento a partir del caudal de 30 l/s. Esto significa que, dado que el área de huecos es constante debido a que, como ya se ha comentado, en esta combinación de pendientes, la sección del sumidero siempre queda cubierta por el agua (área de huecos efectiva es equivalente al área de huecos total), en la primera fase el valor de K depende principalmente de la variación de caudal, ya que el cuadrado de este es inversamente proporcional a K y en esta fase se observa una disminución de la constante de pérdidas a medida que aumenta el caudal, todo teniendo en cuenta, según se puede ver en el Gráfico 3, que el valor de ΔH (diferencia entre el calado registrado sin reja y el obtenido con su presencia), termino directamente proporcional, tiende a aumentar a medida que el caudal también lo hace. Sin embargo, en la segunda fase el termino más importante en la expresión de K es ΔH , ya que el valor de la constante aumenta al aumentar éste, aunque el caudal también se esté incrementando.

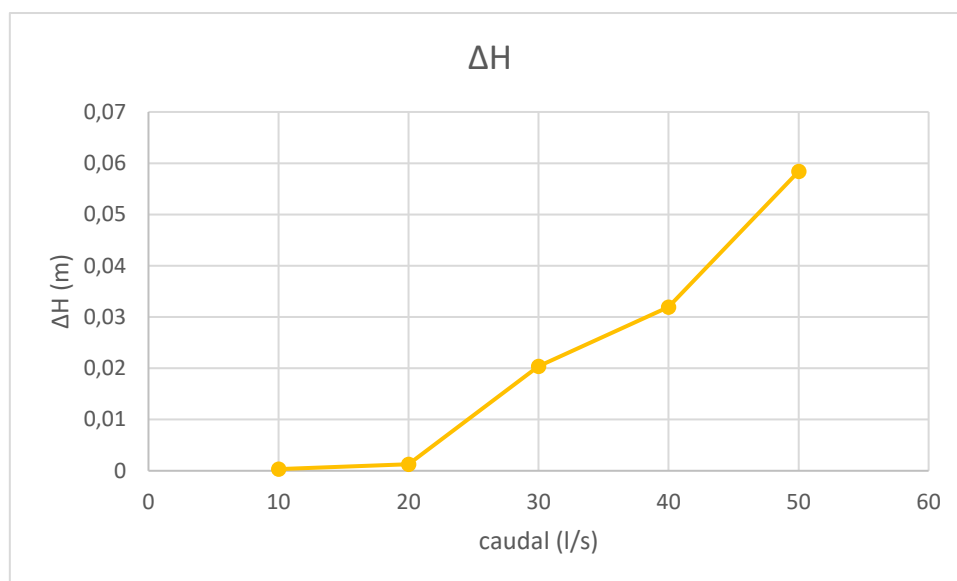


Gráfico 24: Evolución de ΔH al aumentar el caudal de salida.

Dejando al margen esta variación de la constante de pérdidas, podemos decir que sus valores se encuentran en un intervalo entre 0,4 y 0,7.

Una pareja de gráficos donde también es posible observar el efecto del caudal de salida sobre el comportamiento del flujo del agua es la que se encuentra a continuación. En esta se muestra la progresión del coeficiente de desagüe en el caso con reja y sin reja, para diferentes escenarios con caudal fijado y pendientes longitudinal y transversal variables.

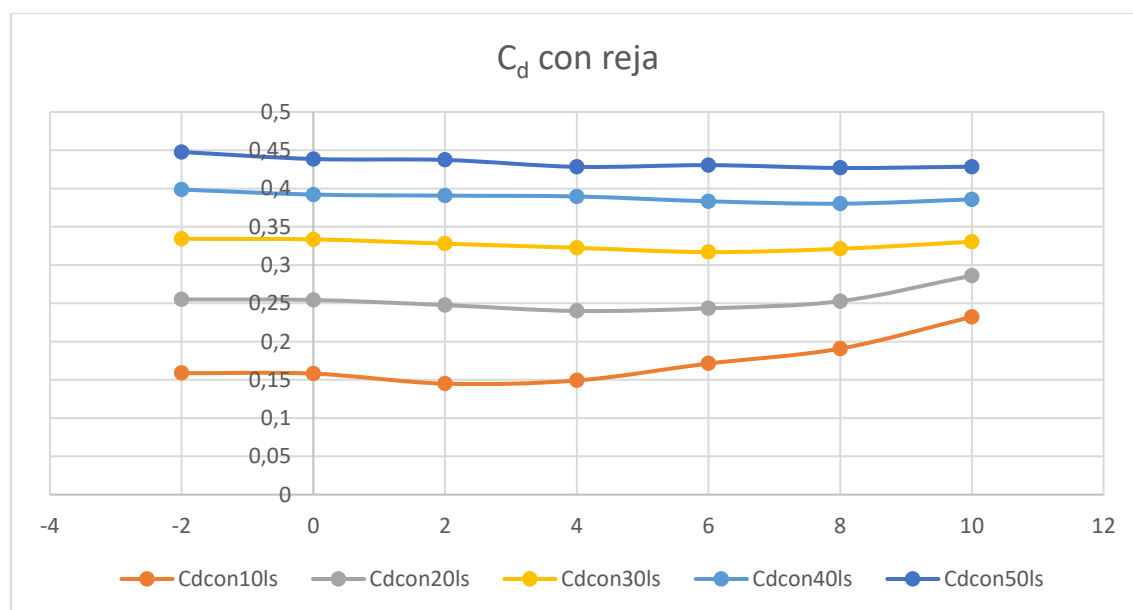


Gráfico 25: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con la variación de las pendientes en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario con reja.

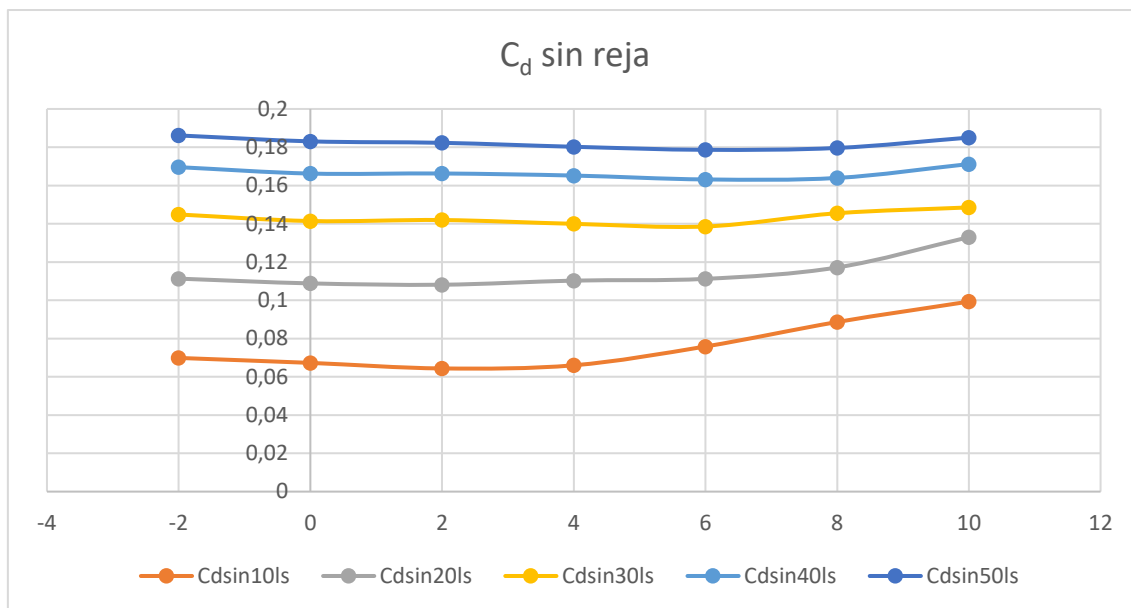


Gráfico 26: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con la variación de las pendientes en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario sin reja.

Comentario referente al formato del eje de abscisas:

En el valor -2 del eje, este representa la situación 0% pendiente transversal y 0% pendiente longitudinal, se ha mostrado en este punto para que pudiese ser comparada con los demás casos en los que la pendiente transversal se ha fijado en el 2% y la longitudinal sufre una progresión de 0% a 10%.

Respecto a los resultados obtenidos, podemos decir que a partir de caudales de 30 l/s, el coeficiente de desagüe se mantiene constante, mientras que con caudales inferiores se observa que a medida que reducimos el caudal, más representativo se muestra el efecto de la pendiente longitudinal, evitando que el C_d sea constante y generando un crecimiento de éste con los valores de la pendiente. Esto es debido a que es posible que el método utilizado para el cálculo del calado medio sobre el sumidero no es suficiente detallado para estos casos de bajo caudal y elevada pendiente longitudinal, dado que esta conduce a que la lámina de agua se desplace rápidamente aguas debajo de la superficie del sumidero, incluso provocando en ocasiones, como ya se ha comentado, partes de la sección del imbornal sin flujo de salida de agua, todo esto comporta que se puedan obtener algunos resultados con error. Si para analizar los resultados consideramos los caudales de 30 l/s, 40 l/s y 50 l/s, podemos calcular los valores de C_d aproximados en los que se mantiene constante en cada caudal:

Tabla 27: Valores de C_d medios para diferentes caudales, con reja y sin ella.

Q (l/s)	C_d con reja	C_d sin reja
30	0,327	0,143
40	0,389	0,167
50	0,434	0,182

Concluyendo, podemos decir que el coeficiente de desagüe aumenta con el caudal de salida, como es evidente debido a que están directamente relacionados, pero cada vez en menor proporción, ya que en el gráfico podemos ver que las líneas de progresión de C_d cada vez están más juntas al elevar el caudal del flujo de salida, y por lo tanto nos encontramos ante un comportamiento en el que la diferencia entre C_d de caudales bajos es elevada, pero a medida que crecen los valores de C_d tienden a valores similares.

5.4 Efecto de la pendiente:

Pendiente transversal:

Para poder analizar el efecto de la pendiente transversal en el comportamiento del flujo de agua, se compararán los resultados obtenidos en las simulaciones con pendiente transversal 0% y longitudinal 0%, y los extraídos de las que tienen pendiente transversal 2% y longitudinal 0%. Se adoptan estos valores pues la gran mayoría de pendientes transversales observadas en las calles se mueven entre estos dos valores, teniendo como finalidad principal el favorecimiento de la captación del agua que circula por superficie por parte de la red de alcantarillado.

Haciendo referencia al coeficiente de desagüe, para el primer escenario de pendientes en la plataforma (0% pendiente transversal y 0% pendiente longitudinal), ya hemos podido ver en el Gráfico 1, la progresión de este valor al variar el caudal de salida, tanto con reja como sin reja en el imbornal. Respecto al segundo escenario (2% pendiente transversal y 0% pendiente longitudinal), se pueden observar a continuación los resultados obtenidos:

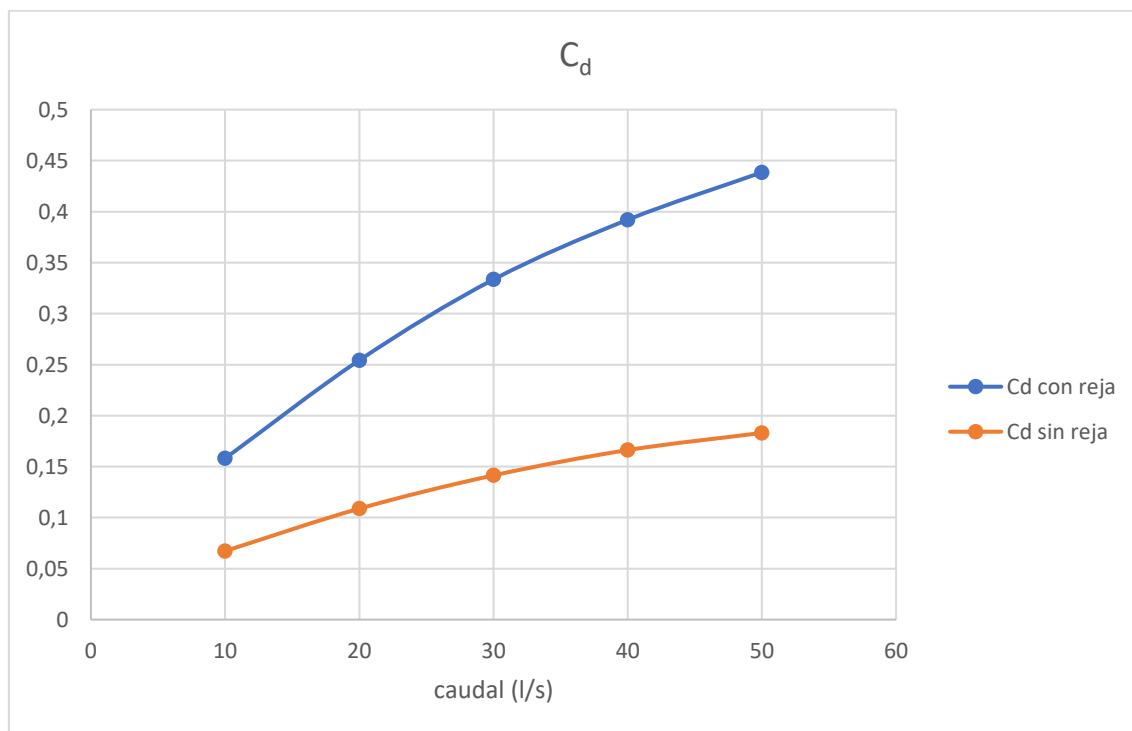


Gráfico 28: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con el aumento del caudal de salida, únicamente con 2 % de pendiente transversal en la plataforma, con reja y sin ella.

En este gráfico, en el que se han mostrado los resultados del segundo escenario de forma similar a como se hizo con los del primer escenario, es posible observar que tiene un comportamiento muy parecido al caso sin pendiente transversal: valor del coeficiente de desagüe creciente con el aumento de caudal y resultados del coeficiente más elevados con presencia de la reja que sin ella.

Comparando numéricamente los datos obtenidos en ambos escenarios, obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 29: Valores de C_d máximos y mínimos para diferentes pendientes transversales, con reja y sin ella.

	Valor mínimo Pend. trans. = 0% Pend. long. = 0%	Valor mínimo Pend. trans. = 2% Pend. long. = 0%	Valor máximo Pend. trans. = 0% Pend. long. = 0%	Valor máximo Pend. trans. = 2% Pend. long. = 0%
C_d con reja	0,159	0,158	0,448	0,439
C_d sin reja	0,070	0,067	0,186	0,183

Observando detenidamente esta tabla, es posible notar que el efecto generado por dotar a la plataforma de una pendiente transversal del 2% es prácticamente inapreciable en cuanto a los resultados del coeficiente de desagüe obtenidos tanto en los casos con reja como en los que no está presente. Dada la similitud en los resultados que se han obtenido en esta segunda configuración de pendientes de la plataforma respecto el primer escenario, en este caso también se comprueba que los valores de este coeficiente mencionados en algunos de los artículos del Capítulo 2, están bastante alejados de los que hemos obtenido en las simulaciones.

En relación con la constante de pérdidas de carga localizadas (K), para mostrar los datos obtenidos en el segundo escenario y realizar una comparativa con los resultados del caso sin pendiente transversal, ya mostrados anteriormente, se utilizará la siguiente representación gráfica, en la que se exponen los datos obtenidos para los dos casos:

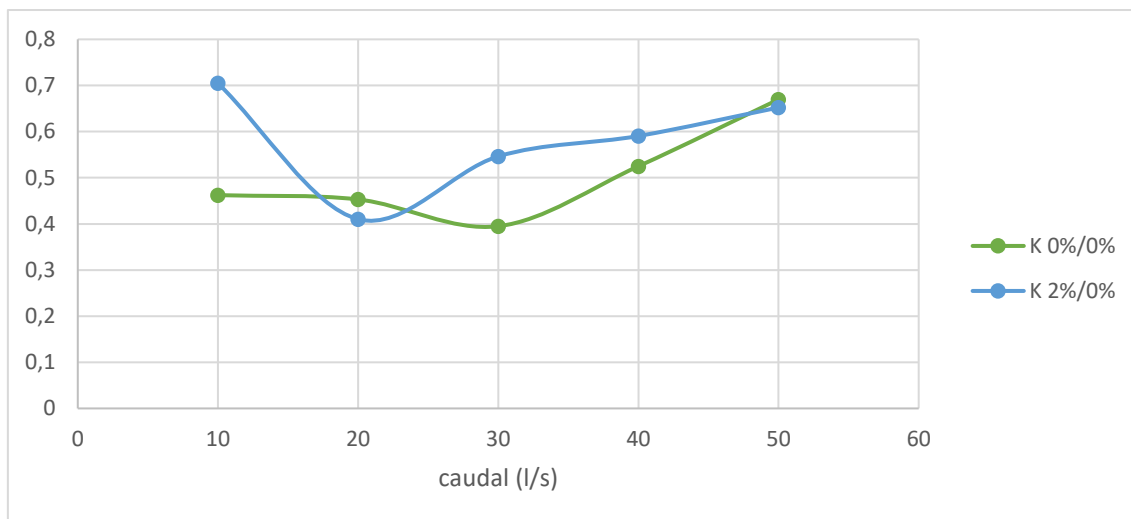


Gráfico 30: Representación de la evolución de la constante K con el aumento del caudal de salida en dos escenarios: sin pendientes y con 2% de pendiente transversal en la plataforma.

Analizando los resultados, podemos decir que el comportamiento de ambas curvas de progresión respecto del caudal es bastante similar, es decir, empiezan con un tramo de decrecimiento del valor de K, hasta un cierto valor de caudal, a partir del cual cambian a una tendencia de crecimiento de la constante. El punto de cambio de la tendencia es diferente en los dos escenarios, siendo menor el caudal del caso donde la plataforma cuenta con pendiente transversal, aunque en ese valor mínimo de la curva, ambos escenarios proporcionan un resultado de la constante muy parecido. Por lo tanto, podemos decir que el efecto que genera el incremento de la pendiente transversal sobre la evolución de la constante de pérdidas con el aumento de caudal es el desplazamiento del valor mínimo de K hacia valores de caudal de salida más altos, la cual cosa también representa que la primera fase de la curva de K, donde el termino más influyente en su valor, como se ha mencionado antes, es el caudal. Mientras la fase más influenciada por el valor de ΔH (diferencia entre el calado registrado sin reja y el obtenido con su presencia) se ve desplazada hacia valores de caudal más altos.

A pesar de las diferencias en las curvas de evolución de K con el caudal, se puede observar que el rango de valores de la constante de pérdidas que se obtienen para los dos supuestos es el mismo: los datos oscilan entre 0,4 y 0,7.

Pendiente longitudinal:

Para poder evaluar con exactitud el efecto que puede producir la pendiente longitudinal de la calle sobre el flujo de salida de agua, se ha considerado oportuno estudiar un conjunto de casos tanto con reja como sin ella en los que se establecen diversos valores de pendientes longitudinales entre 0% y 10%, mientras que la pendiente transversal es fijada en 2%. Se han decidido establecer estas pendientes por el hecho de ser las habituales en las calles de las ciudades como Barcelona.

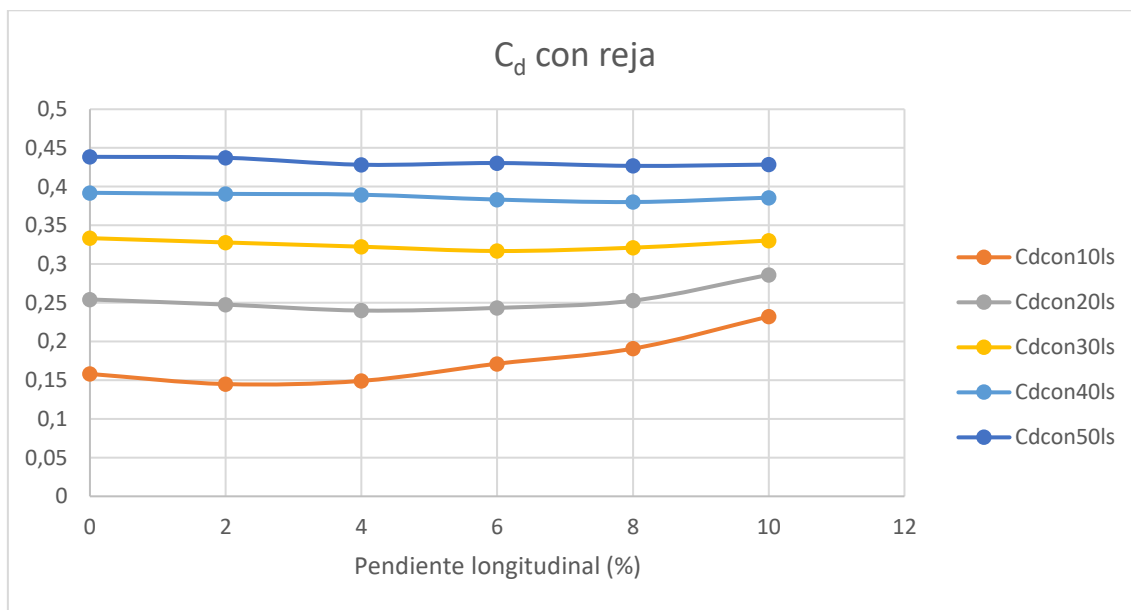


Gráfico 31: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con la variación de la pendiente longitudinal en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario con reja.

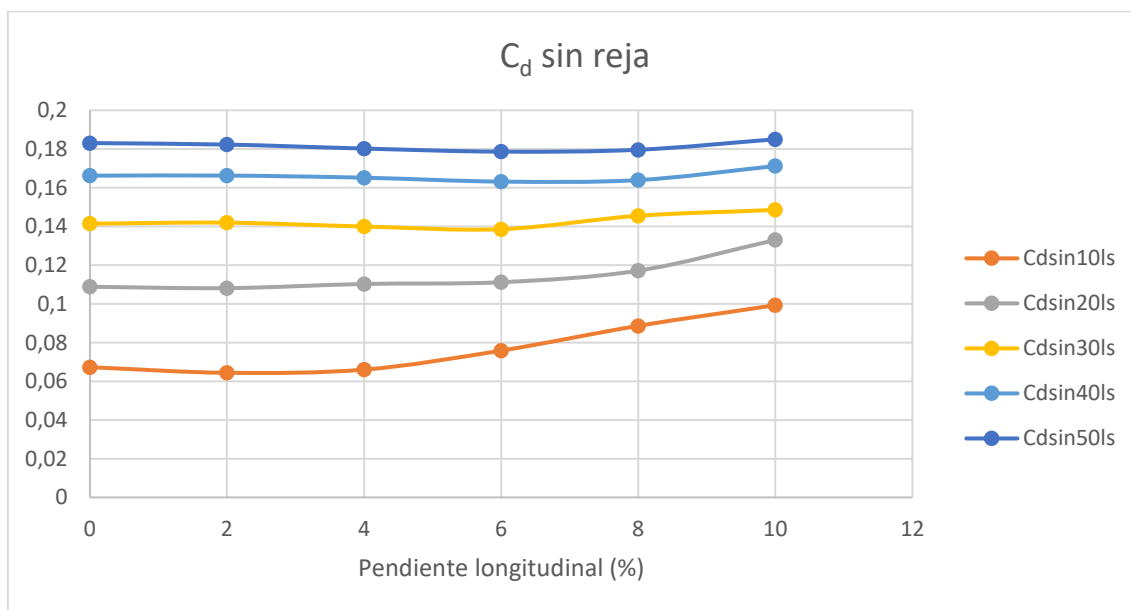


Gráfico 32: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe con la variación de la pendiente longitudinal en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario sin reja.

Haciendo referencia al coeficiente de desagüe (C_d), según los resultados obtenidos en las simulaciones, que han sido representados en los anteriores gráficos, es posible observar, de forma similar a lo comentado anteriormente en el apartado referente a los efectos del caudal, que la variación de la pendiente longitudinal prácticamente no tiene ninguna influencia sobre el valor del coeficiente para caudales elevados (a partir de 30 l/s), mientras que a medida que el caudal se reduce el gráfico tiende a mostrar datos del coeficiente de desagüe más elevados al incrementarse la pendiente longitudinal, manifestándose antes este suceso en el escenario con ausencia de reja que en el que cuenta con ella. Esta similitud entre los datos de coeficiente de desagüe obtenidos para diferentes pendientes longitudinales para un mismo caudal, se estima que es debida al hecho de que para caudales elevados, el aumento de la pendiente longitudinal no genera un gran impacto sobre la altura de agua medida sobre la sección del sumidero. En el siguiente gráfico es posible observar la que los datos del calado medio sobre el sumidero (Δh) para un caudal de salida de 50 l/s, tanto con reja como sin ella, se mantienen prácticamente constantes con el incremento de la pendiente longitudinal.

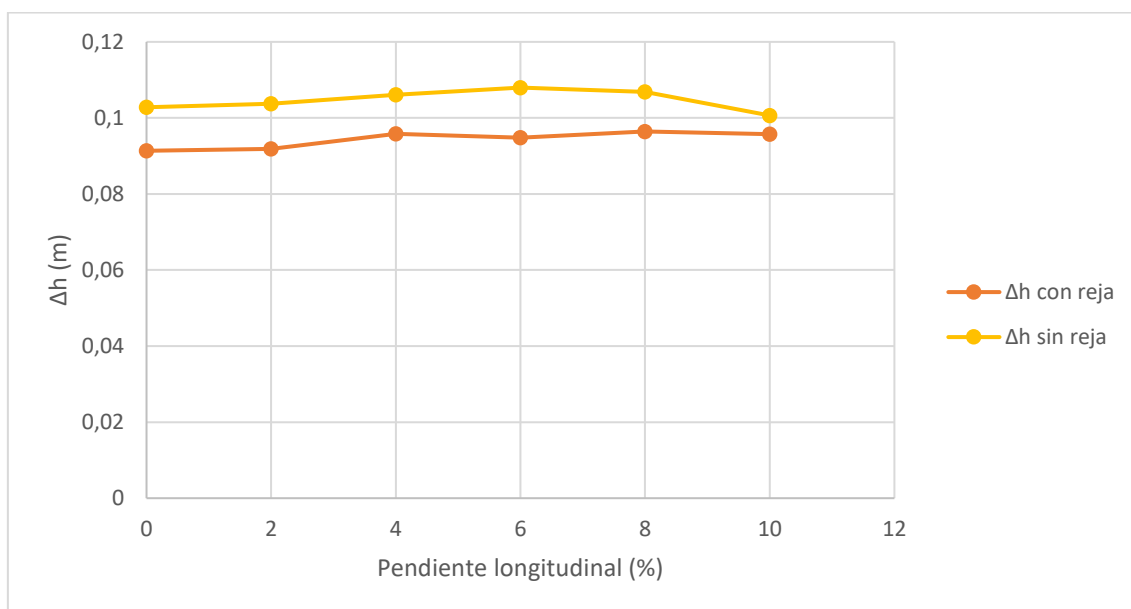


Gráfico 33: Representación de la evolución de Δh con la variación de la pendiente longitudinal en la plataforma, para 50 l/s, en el escenario con y sin reja.

Desde el punto de vista de la constante de pérdidas localizadas (K), en el siguiente gráfico podemos ver el comportamiento de este valor para diversos caudales (50 l/s y 40 l/s) a medida que se va aumentando la pendiente longitudinal:

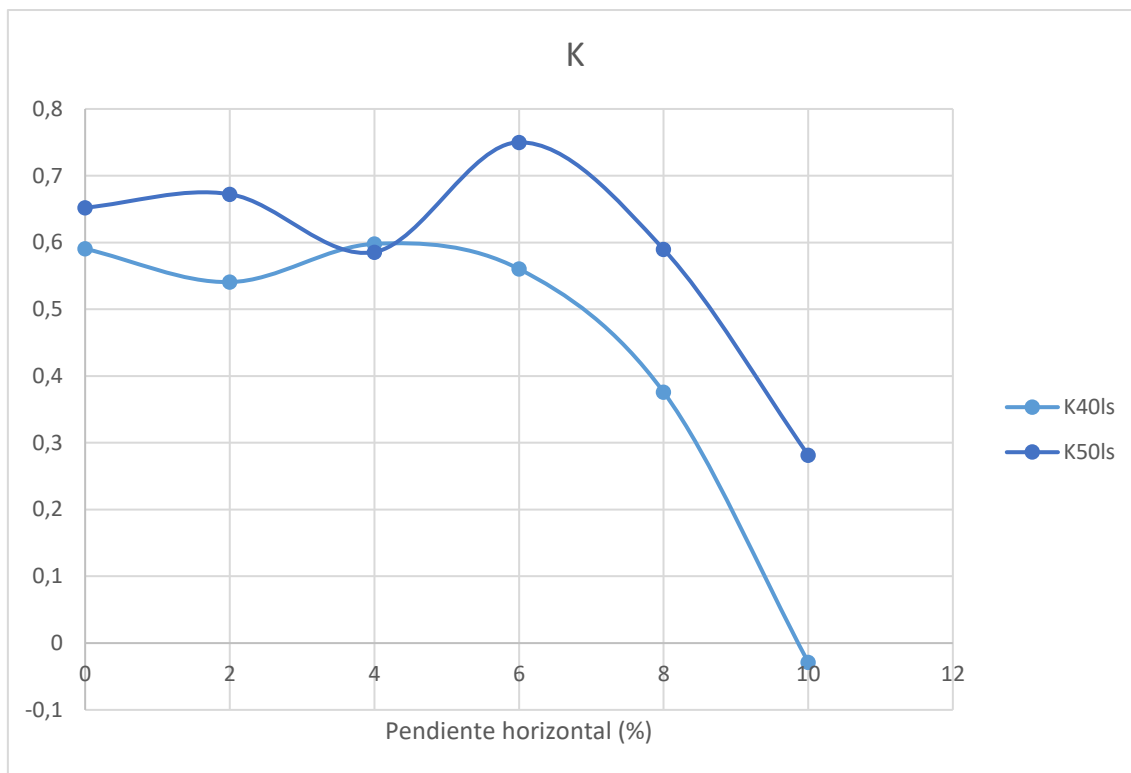


Gráfico 34: Representación de la evolución de la constante K con el aumento de la pendiente longitudinal, para los caudales de 40 l/s y 50 l/s.

Tabla 35: Valores de la constante K para diferentes pendientes, para los caudales de 40 l/s y 50 l/s.

Q=40l/s		Q=50l/s	
Pendientes	K40ls	Pendientes	K50ls
0%/0%	0,525	0%/0%	0,670
2%/0%	0,591	2%/0%	0,652
2%/2%	0,541	2%/2%	0,672
2%/4%	0,598	2%/4%	0,586
2%/6%	0,560	2%/6%	0,750
2%/8%	0,376	2%/8%	0,590
2%/10%	-0,029	2%/10%	0,282

De esta representación podemos extraer que el valor de la constante para la mayoría de pendientes es superior cuanto mayor es el caudal de salida, siendo el aspecto de las trayectorias de estos datos respecto a la pendiente longitudinal prácticamente paralelas entre ellas. También es posible observar que a partir de un cierto valor de la pendiente el resultado de K comienza a bajar notablemente. Este dato en ningún caso puede ser inferior a cero, no obstante, para el caudal de 40 l/s y 10 % de pendiente longitudinal, se ha obtenido una constante negativa. Este dato erróneo se estima que se alcanza por el hecho de que con una pendiente longitudinal muy

elevada podría ser insuficiente considerar únicamente la superficie que ocupa la reja, para calcular la altura de agua media, ya que en el momento en el que se produce la salida de agua del imbornal, ésta es desplazada rápidamente en el sentido de la pendiente, tal y como ha sido comentado con anterioridad. Para la muestra de estos resultados ha sido aplicada previamente la metodología de la determinación del área de huecos efectiva, pero aun así es claro que existe un error que no se soluciona únicamente con esta corrección.

5.5 Escenarios con resultados remarcables:

Es necesario comentar algunos de los casos en los que la combinación de fuertes pendientes y reducidos caudales de salida producen que no exista flujo de agua en algunos puntos de la sección del imbornal, como por ejemplo el correspondiente a la imagen de la simulación mostrada a continuación:

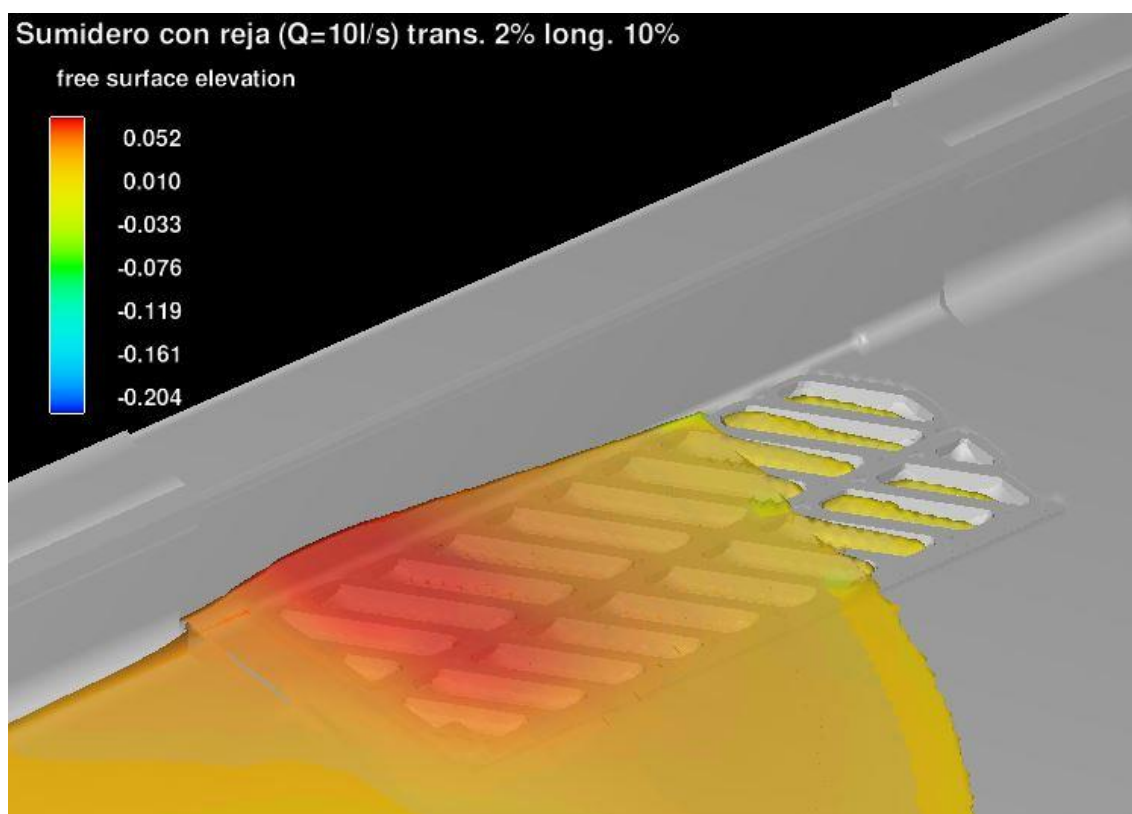


Figura 36: Representación tridimensional del calado sobre el imbornal con flujo de salida de 10 l/s en estado estacionario, con pendiente transversal 2% y longitudinal 10%.

Como es posible observar en la figura anterior, correspondiente al modelo con caudal de 10 l/s, pendiente transversal del 2% y longitudinal del 10%, prácticamente una tercera parte del área de huecos de la reja no está ejerciendo como sección de salida de agua, por lo tanto, no sería correcto no realizar algún tipo de corrección que definiera un área de huecos efectiva (la que está siendo usada en casa ocasión), tal y como se ha llevado a cabo en este estudio. El de la imagen es el escenario más desfavorable simulado haciendo referencia a este aspecto, ya que

simula el caudal mínimo estudiado y las pendientes máximas de la plataforma ensayada. No obstante, este fenómeno también se ha mostrado, aunque en menor medida, en otras simulaciones:

Tabla 37: Valores del área efectiva para los diferentes escenarios en los que el calado no cubría toda la sección del sumidero.

Caudal (l/s)	Pendiente transversal (%)	Pendiente longitudinal (%)	Reja	Area efectiva (%)
10	2	6	Si	92,3
10	2	6	No	92,3
10	2	8	Si	83,1
10	2	8	No	81,5
10	2	10	Si	69,2
10	2	10	No	69,2
20	2	8	No	96,9
20	2	10	Si	90,8
20	2	10	No	89,2

Según muestran los resultados mostrados en la tabla anterior, el efecto de la reducción del área de huecos efectiva tiene una influencia mayor en los casos con ausencia de reja, incluso si nos fijamos en la configuración de caudal = 20 l/s, pendiente transversal del 2% y longitudinal del 8%, podemos notar que en la situación con reja en el sumidero, no existe una reducción del área de huecos efectiva, mientras que sin ella sí que hay presente una reducción de aproximadamente el 3% del total de área de la sección.

Resultados similares a estos pueden ser obtenidos mediante otra metodología: visualización de los modelos tridimensionales del flujo de salida al alcanzar el estado estacionario. Los valores de área efectiva de huecos que resultan por esta, se muestran a continuación mediante las imágenes de las simulaciones de los diferentes escenarios:

Sumidero con y sin reja (Q=10l/s) trans. 2% long. 6% (Caso 1 y 2)

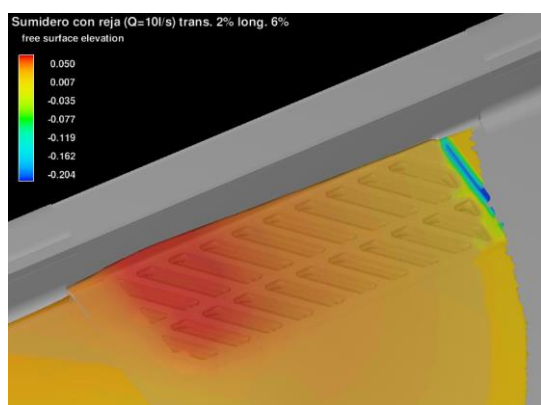


Figura 38: Área efectiva = 98,4 %.

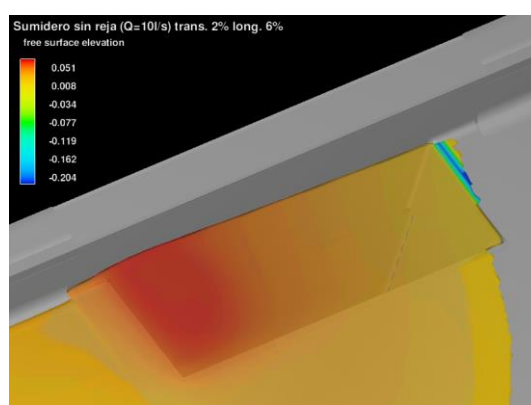


Figura 39: Área efectiva = 93,8 %.

Sumidero con y sin reja (Q=10l/s) trans. 2% long. 8% (Caso 3 y 4)

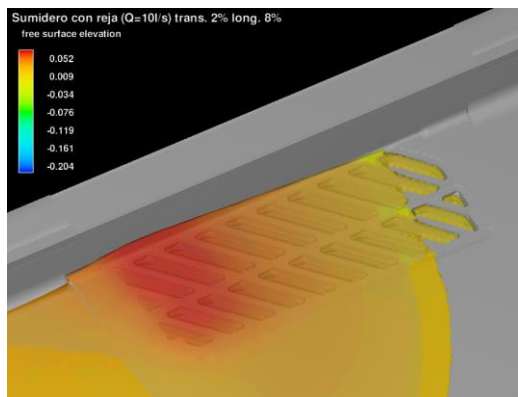


Figura 40: Área efectiva = 86,9 %.

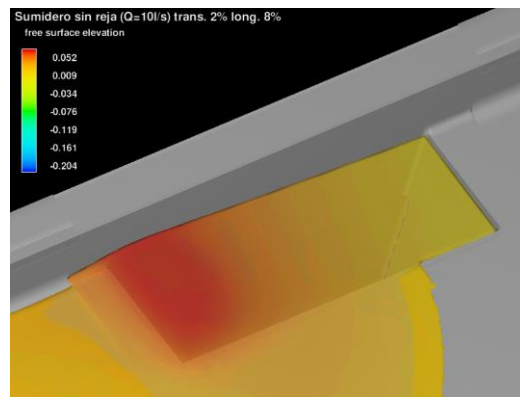


Figura 41: Área efectiva = 75,2 %.

Sumidero con y sin reja (Q=10l/s) trans. 2% long. 10% (Caso 5 y 6)

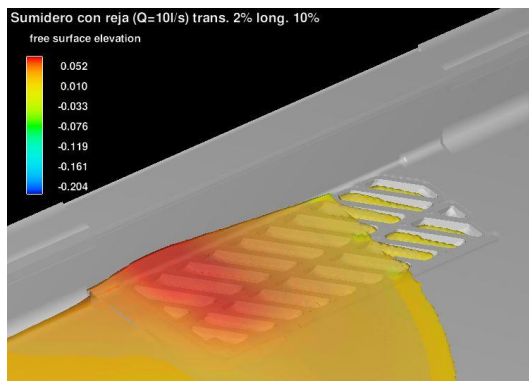


Figura 42: Área efectiva = 73,6 %.

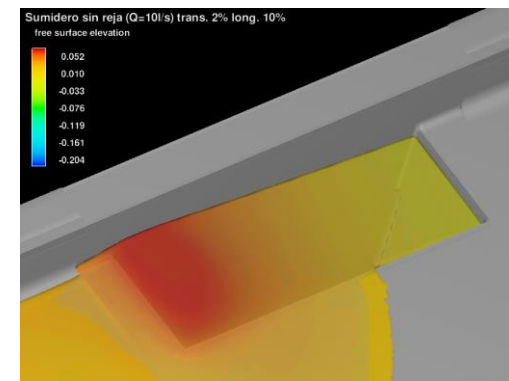


Figura 43: Área efectiva = 62,7 %.

Sumidero sin reja (Q=20l/s) trans. 2% long. 8% (Caso 7)

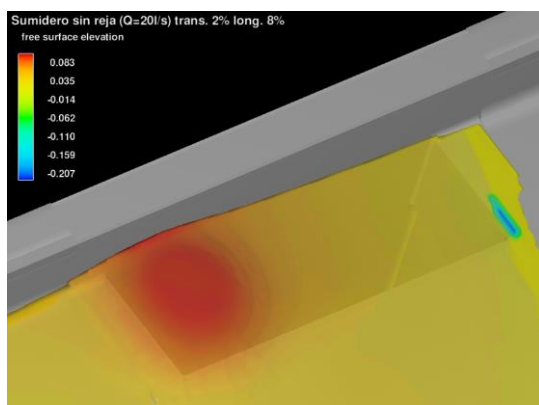


Figura 44: Área efectiva = 99,5 %.

Sumidero con y sin reja (Q=20l/s) trans. 2% long. 10% (Caso 8 y 9)

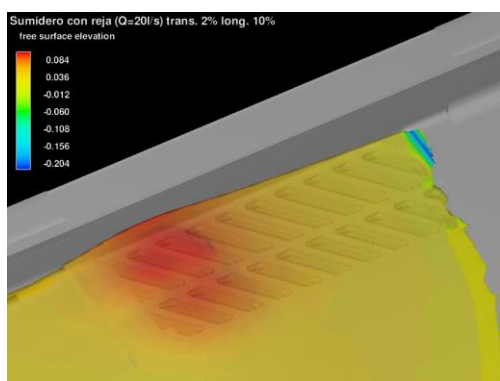


Figura 45: Área efectiva = 96,7 %.

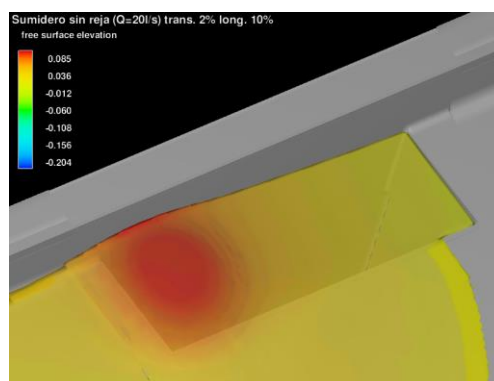


Figura 46: Área efectiva = 88,3 %.

Tabla 47: Comparativa áreas efectivas obtenidas por los datos de las probes y por la visualización del modelo 3D del flujo.

Casos	Reja	Área efectiva por probes (%)	Área efectiva por visualización (%)
1	Si	92,3	98,4
2	No	92,3	93,8
3	Si	83,1	86,9
4	No	81,5	75,2
5	Si	69,2	73,6
6	No	69,2	62,7
7	No	96,9	99,5
8	Si	90,8	96,7
9	No	89,2	88,3

Dada la tabla anterior, podemos decir que en la mayoría de escenarios con presencia de reja el resultado tiende a ser mayor para la segunda metodología, mientras que para los casos sin reja, los valores de área de huecos efectiva más elevados acostumbran a ser los logrados mediante la primera metodología. Aun y así, los datos obtenidos con ambos métodos son realmente similares, teniendo como diferencia máxima 6,5 %, la cual es obtenida en el caso 6.

Teniendo en cuenta estos nuevos resultados de áreas eficaces, calculadas mediante esta segunda metodología, basada en la visualización de los modelos tridimensionales de flujo, nos es posible recalcular tanto el coeficiente de desagüe como la constante de pérdidas para cada caso de los mencionados anteriormente.

Tabla 48: Comparativa C_d calculados por las áreas efectivas obtenidas mediante datos de las probes y por la visualización del modelo 3D del flujo.

Casos	Reja	C_d metodología 1	C_d metodología 2
1	Si	0,129	0,161
2	No	0,057	0,076
3	Si	0,191	0,182
4	No	0,089	0,096
5	Si	0,232	0,218
6	No	0,099	0,110
7	No	0,117	0,114
8	Si	0,286	0,269
9	No	0,133	0,134

Según se observa en la tabla anterior, para los escenarios con caudal de salida 10 l/s cualquier variación del área efectiva genera un aumento en el valor de C_d hasta una configuración de la pendiente longitudinal del 8% (este caso incluido), mientras que para pendientes superiores y para las ocasiones en las que el caudal es de 20 l/s, un aumento del área efectiva genera una disminución del coeficiente de desagüe, y una reducción de esta comporta un incremento.

Incluyendo estos nuevos valores de C_d en las representaciones gráficas mostradas en el 4º apartado de este capítulo, el resultado es el siguiente:

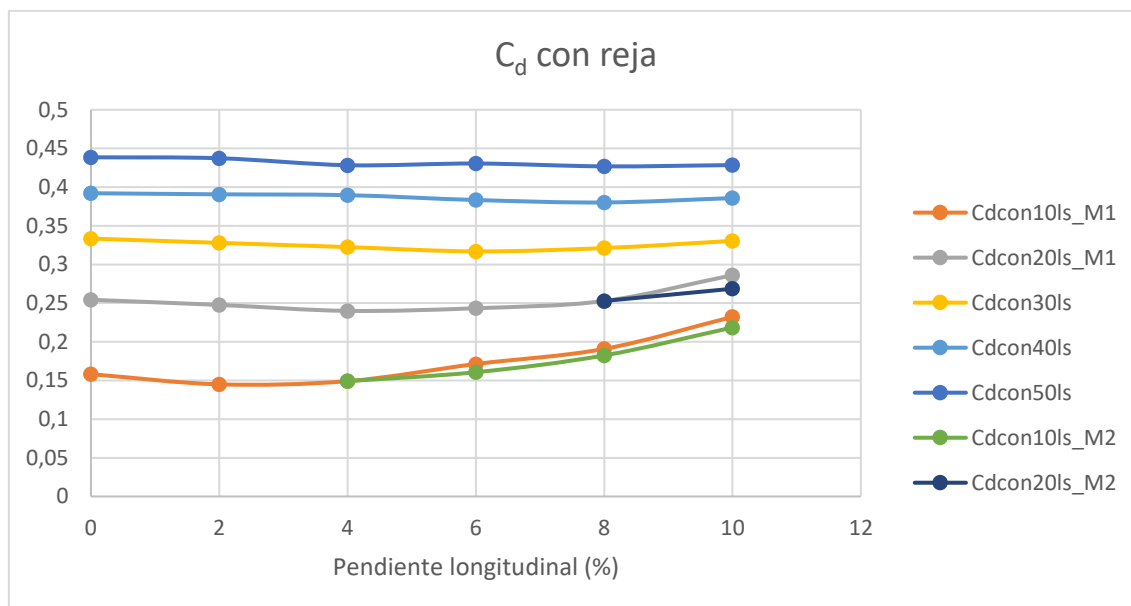


Gráfico 49: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe, calculado con la primera y segunda metodología (M1 y M2), con la variación de la pendiente longitudinal en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario con reja.

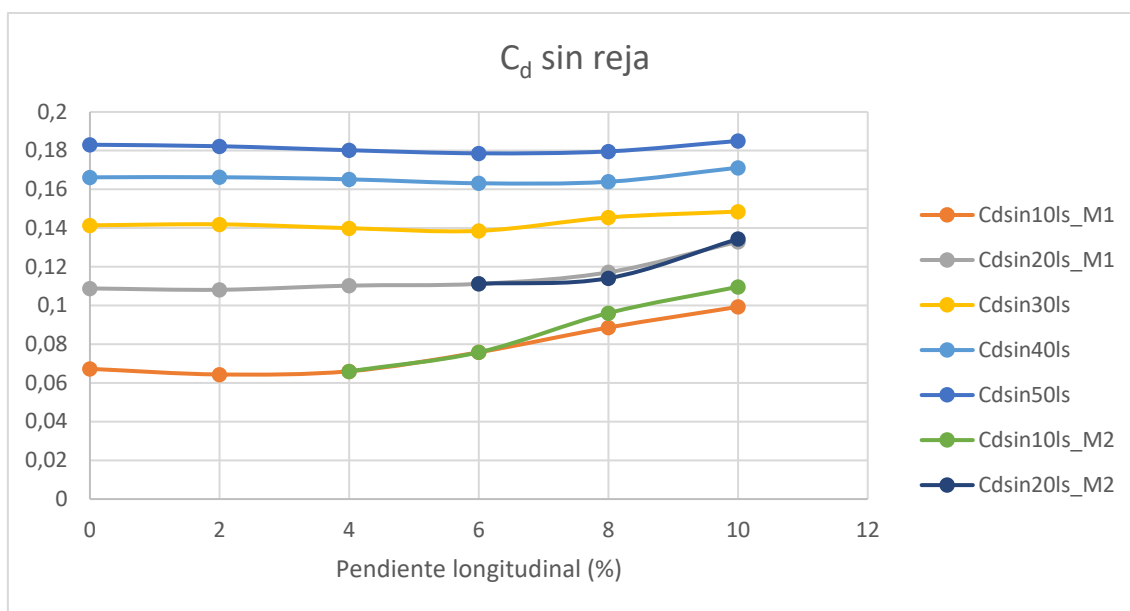


Gráfico 50: Representación de la evolución del coeficiente de desagüe, calculado con la primera y segunda metodología (M1 y M2), con la variación de la pendiente longitudinal en la plataforma, para diferentes caudales, en el escenario sin reja.

Tal y como se muestra en los dos gráficos anteriores, las diferencias entre las curvas definidas por los resultados obtenidos con la metodología 1 (basada en los datos de las probes) y con la metodología 2 (basada en la visualización del modelo 3D del flujo), son bastante reducidas, e incluso en algunos casos prácticamente inapreciables.

En referencia a la constante de pérdidas, no se han observado grandes variaciones en los nuevos resultados, esto indica que sigue persistiendo el error de cálculo que ha sido comentado anteriormente cuando se analizaban los valores obtenidos para la primera metodología de cálculo.

Para acabar, después de analizar detalladamente el comportamiento del agua en todas estas simulaciones, se ha determinado que la causa de que los escenarios sin reja sean más propensos a este fenómeno es debido a que se estima que la reja genera una retención añadida de parte del flujo de salida, y además mejora la dispersión de dicho flujo sobre la plataforma.

Capítulo 6: Conclusiones

Este estudio se ha centrado en la elaboración de un modelo numérico, mediante una aproximación de flujo 3D, con el objetivo de analizar el comportamiento de un flujo de agua al salir de un imbornal, de cara a comprender este fenómeno que se viene dando en muchas ciudades y con la finalidad de emular los ensayos que se llevarán a cabo en el laboratorio de hidráulica e hidrología de la UPC con la reja “Barcelona 1”.

Uno de los principales motivos que han llevado a su realización ha sido el estado del panorama actual referente a este tema, ya que según se ha podido comprobar, nos encontramos delante de un fenómeno hidráulico que, aun siendo habitual en ciertos períodos del año en algunas ciudades, no ha sido analizado con profundidad hasta la fecha, e incluso en algunos casos ha sido considerado simplemente como una salida de agua por un orificio con coeficientes de desagüe habituales (0,55 – 0,60).

Dado que durante la mayor parte del proceso de elaboración de este estudio no ha sido posible la evaluación experimental a escala real de este fenómeno, se ha decidido realizar su análisis mediante la simulación de diferentes situaciones definidas por el caudal de salida y las pendientes de la plataforma con el software Flow-3D, utilizado anteriormente en estudios similares y que ha demostrado su buen desempeño en este tipo de estudios.

Los resultados obtenidos han mostrado que la forma más sencilla de caracterizar el comportamiento del flujo de salida de agua de un sumidero es el coeficiente de desagüe, ya que se ha mostrado con valores muy similares en los escenarios con caudal constante y variaciones tanto de la pendiente transversal como longitudinal de la plataforma. Además, en los casos en los que se ha incrementado el caudal de salida, se ha visto que la evolución de los valores de C_d muestra una tendencia a proporcionar valores más similares para caudales muy elevados. No obstante, también es posible utilizar la constante de pérdidas (K) que genera la reja que cubre el sumidero sobre el flujo de salida, aunque se ha podido ver que sus valores tienden a ser muy influenciados tanto por la variación del caudal de salida como por las pendientes determinadas por la plataforma.

En referencia a los intervalos numéricos de los resultados obtenidos, respecto al coeficiente de desagüe, para los escenarios con reja sobre el imbornal los datos crecen desde valores de 0,14 a 0,45 para el caudal más alto analizado (50 l/s), mientras que para los casos sin reja los coeficientes de desagüe resultantes se encuentran entre 0,06 y 0,19 para 50 l/s. Como se puede observar en ninguna de las dos situaciones se alcanzan datos de C_d tan elevados como los mencionados por otros estudios que han sido comentados en el Capítulo 2: Estado del arte, y, tal y como se ha explicado en el anterior capítulo, se estima que tampoco se podrían conseguir para otras configuraciones de caudales y pendientes de la plataforma que no han sido tratadas en este estudio.

En lo que concierne a los valores calculados para la constante de pérdidas (K), como se ha dicho anteriormente, vienen muy marcados por la variación de los diferentes factores que determinan el modelo tridimensional del ensayo, aun las oscilaciones observadas en las representaciones gráficas mostradas en el Capítulo 5, los casos afectados principalmente por el caudal de salida producen un intervalo de K entre 0,4 y 0,7, mientras que para escenarios donde el factor principal, el cual se quería evaluar su efecto, eran las pendientes de la plataforma, se han

conseguido datos en un intervalo entre 0,5 y 0,8 para pendientes longitudinales no superiores a 6% y transversales de 2%. Como se ha mostrado anteriormente, en este estudio también se han analizado simulaciones con pendientes longitudinales más elevadas, pero se ha estimado que a partir del 6% los resultados contienen un error producido por el rápido desplazamiento del calado de agua fuera del área de estudio (sección del sumidero), incluso en alguna ocasión se alcanzan valores negativos de K , algo imposible.

Después de visualizar detalladamente las representaciones tridimensionales del flujo de agua en estado estacionario sobre el modelo de la plataforma, se han observado un conjunto de escenarios representados principalmente por las simulaciones con 10 l/s de caudal de salida y pendientes longitudinales de 6% o superior, en los cuales la sección del imbornal no queda cubierta totalmente por el agua, es decir, el flujo no alcanza la superficie de la plataforma haciendo uso de toda el área de huecos, sino solo una porción. Para representar este fenómeno en el momento de obtener C_d y K , se ha definido el término “área de huecos efectiva”, la cual ha sido calculada mediante los datos recogidos por los diferentes puntos de medición del ensayo o a partir de la simple observación visual del comportamiento del flujo tridimensional en el interior del modelo.

Aunque los ensayos a escala real aún no se han llevado a cabo en su totalidad, algunas de las medidas parciales que se han podido obtener en referencia a las alturas de agua del flujo de salida en estado estacionario sobre el imbornal, coinciden en orden de magnitud con los resultados proporcionados por las simulaciones por ordenador realizadas con el modelo tridimensional presentado en este estudio.

Referencias bibliográficas:

Bazin, P., Nakagawa, H., Kawaike, K., Paquier, A., Mignot, E. (2014), "Modeling Flow Exchanges between a Street and an Underground Drainage Pipe during Urban Floods", *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, October 2014, Vol. 140, Issue 10.

Chen, A. S., Leandro, J., Djordjević, S. (2016) "Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations", *Urban Water Journal*, 13:8, pp. 830-840.

Comport, B. C., Thornton, C. I. (2012), "Hydraulic Efficiency of Grate and Curb Inlets for Urban Storm Drainage", *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, October 2012, pp. 878-884.

Djordjevic, S., Saul, A. J., Tabor, G. R., Blanksby, J., Galambos, I., Sabtu, I., Sailor, G. (2011), "Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems", 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, September 2011, pp. 10-15.

Fang, X., Jiang, S., Alam, S. R. (2010) "Numerical Simulations of Efficiency of Curb-Opening Inlets", *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, January 2010, pp. 62-66.

FLOW-3D User Manual (2015), Version 11.1.0. Flow Science, Inc.

Gómez, M., Recasens, J., Russo, B., Martínez-Gomariz, E. (2016) "Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: numerical and experimental comparison", *Water Science & Technology*, October 2016, 74 (8), pp. 1926-1935.

Gómez, M., Russo, B. (2011), "Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets", *Water Management*, Volume 164 Issue WM2, 2011.

Hakiel, J., Szydlowski, M. (2017), "Interaction between storm water conduit and surface flow for urban flood inundation modelling", *Int. J. Sus. Dev. Plann.* Vol. 12, No. 1, pp. 133-143.

Jahanbazi, M., Egger, U. (2014), "Application and comparison of two different dual drainage models to assess urban flooding", *Urban Water Journal*, 11:7, pp. 584-595.

Leandro, J., Chen, A. S., Djordjević, S., Savić, D. A. (2009), "Comparison of 1D/1D and 1D/2D Coupled (Sewer/Surface) Hydraulic Models for Urban Flood Simulation", *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, June 2009, pp. 495-504.

Leandro, J., Martins, R. (2016), "A methodology for linking 2D overland flow models with the sewer network model SWMM 5.1 based on dynamic link libraries", *Water Science & Technology*, 73 (12), pp. 3017-3026.

Liang, D., Falconer, R. A., Lin, B. (2007), "Linking one- and two-dimensional models for free surface flows", *Water Management* 160 Issue WM3, September 2007, pp. 145-151.

Lopes, P., Leandro, J., Carvalho, R.F., Páscoa, P., Martins, R. (2015), "Numerical and experimental investigation of a gully under surcharge conditions", *Urban Water Journal*, 12 (6), pp. 468–476.

Martins, R., Kesserwani, G., Rubinato, M., Lee, S., Leandro, J., Djordjevic, S., Shucksmith, J. (2016) "Validation of 2D shock capturing flood models around a surcharging manhole", Preprint submitted to Elsevier, May 17, 2016.

Martins, R., Leandro, J., Fernandes de Carvalho, R. (2014), "Characterization of the hydraulic performance of a gully under drainage conditions", *Water Science & Technology*, 69 (12), pp. 2423-2430.

Nanía, L. S., León, A. S., García, M. H. (2015), "Hydrologic-Hydraulic Model for Simulating Dual Drainage and Flooding in Urban Areas: Application to a Catchment in the Metropolitan Area of Chicago", *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE, Vol. 20, Issue 5, May 2015.

Recasens, J. (2014), "Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero", tesina ETSECCPB-UPC, Junio 2014.

Rubinato, M., Martins, R., Kesserwani, G., Leandro, J., Djordjevic, S., Shucksmith, J. (2017), "Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions", Preprint submitted to Elsevier, March 13, 2017.

Rubinato, M., Shucksmith, J., Saul, A. (2013), "Interaction of above/below urban grounds: an experimental facility developed to analyse computer modelling results" Daniel Thevenot. 13th edition of the World Wide Workshop for Young Environmental Scientists (WWW-YES-2013) - Urban waters: resource or risks?, Jun 2013, Arcueil, France. HAL-ENPC, WWW-YES-2013 (03), 2013, WWW-YES.

Sabtu, N. (2015), "Hydraulic interaction between the aboveand below ground drainage systems via gully inlets", thesis The University of Sheffield, Department of Civil and Structural Engineering, March 2015.

Sabtu, N., Saul, A. J., Sailor, G. (2016), "Hydraulic Interaction of a Gully System", American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS) Volume 21, No 1, pp. 202-209.

Uyumaz, A. (1992), "Discharge capacity for curb-opening inlets", Journal of Hydraulic Engineering © ASCE, Vol. 118, No.7, July 1992, pp. 1048-1051.